

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

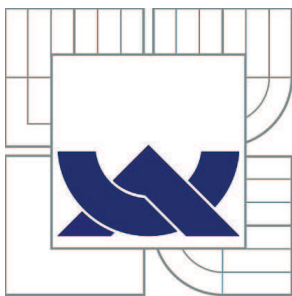
MĚŘENÍ RELATIVNÍ VARIANCE OPTICKÉ INTENZITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

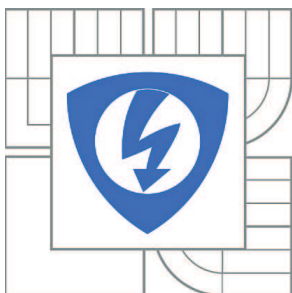
Bc. JAKUB VANÍČEK

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MĚŘENÍ RELATIVNÍ VARIANCE OPTICKÉ INTENZITY

MEASUREMENT OF RELATIVE VARIANCE OF OPTICAL INTENSITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

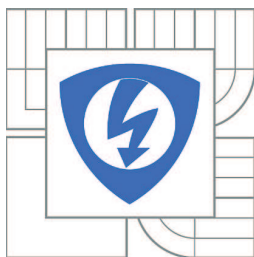
Bc. JAKUB VANÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUCIE DORDOVÁ, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Jakub Vaníček

ID: 77872

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Měření relativní variance optické intenzity

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se blíže s optickými svazky šířícími se atmosférickým přenosovým prostředím. Prostudujte detailně atmosférické turbulence, jejich vznik a vliv na profil laserového svazku.

Sestavte experimentální pracoviště pro měření vlivu turbulencí na intenzitní profil laserového svazku. Pro různé míry atmosférických turbulencí proměřujte vlastnosti laserového svazku.

Stanovte, jaké je rozložení relativní variance optické intenzity v laserovém svazku, a popište danou závislost. Na základě zjištěných parametrů navrhnete optimální tvar laserového svazku pro turbulentní atmosféru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ANDREWS, L. C., PHILLIPS, R. L. Laser Beam Propagation through Random Media. Bellingham: SPIE, 1998.

[2] SALEH, B. E. A., TEICH, M. C. Fundamentals of Photonics. New York: John Wiley, 1991.

[3] ANDREWS, L., PHILLIPS, R., HOPEN, C. Laser Beam Scintillation with Applications. Washington: Spie Press, 2001.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 20.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Lucie Dordová, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cílem mé diplomové práce je měření relativní variance optické intenzity. Nejdříve jsem nastudoval Kolmogorův kaskádní model vzdušných vírů a relativní varianci optické intenzity. Kromě toho jsem se zabýval turbulentními celami, Gaussovým svazkem, Top Hat svazkem a vlivem atmosférických turbulencí na intenzitní profil laserového svazku. Nakonec jsem měřením určil vliv turbulencí na laserový svazek a vypočítal relativní varianci optické intenzity. Z naměřených hodnot jsem navrhnul optimální profil svazku do turbulentní atmosféry.

KLÍČOVÁ SLOVA

Relativní variance optické intenzity, turbulentní cela, fluktuace optické intenzity, Top-hat profil, laserový svazek.

ABSTRACT

The intention of this master's thesis is the measurement of relative variance of optical intensity. In the first place, I have been studied Kolmogorov cascade theory of turbulence and relative variance of optical intensity. In addition, I have been deal with turbulent cells, Gaussian beam, Top Hat beam and influence of the atmospheric turbulences on the intensity profile of the laser beam. Lastly I have been measured determine influence of the atmospheric turbulences on the intensity profile of the laser beam and I have been calculated relative variance of optical intensity. I have suggested the optimum beam profile in the turbulent atmosphere from acquired data.

KEYWORDS

Relative variance of optical intensity, turbulent cell, fluctuation optical intensity, Top-hat profile, laser beam.

Bibliografická citace:

Bc. VANÍČEK, J. *Měření relativní variance optické intenzity*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. Ústav radioelektroniky, 2011. 70 s., 4 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Lucie Dordová, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Měření relativní variance optické intenzity jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 18. května 2011

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Lucie Dordová, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 18. května 2011

.....
podpis autora

Obsah:

1. Úvod	11
2. Turbulence	12
2.1 Dělení a vznik turbulencí	12
2.2 Vliv turbulencí na laserový svazek	13
2.3 Změna dráhy laserového svazku na přenosové trase vlivem turbulencí	14
3. Atmosférické přenosové prostředí	15
4. Relativní variance optické intenzity	16
5. Gaussův svazek a jeho parametry	17
6. Profil Top Hat	19
7. Závislost strukturního parametru na nadmořské výšce a síle větru, Hufnagel – Valley, (H-V) model	20
8. Závislost strukturního parametru na atmosférickém tlaku a teplotě prostředí	21
9. Útlum na přenosové trase optické linky	23
9.1 Útlum způsobený mlhou	23
9.2 Útlum způsobený sněžením	25
9.3 Útlum způsobený turbulencemi	26
10. Metodika měření	28
10.1 Pracoviště s využitím profilometru	30
10.2 Pracoviště s využitím spektrometru a měřáku výkonu	31
11. Výsledky měření	32
11.1 Pracoviště s využitím spektrometru	32
11.2 Pracoviště s využitím P – metru	34
11.3 Měření relativní variance optické intenzity pomocí profilometru	36
11.3.1 Lasery He-Ne o vlnové délce 632,8nm a 543nm	38
11.3.2 Závěr	47
11.4.1 Lasery He-Ne o vlnové délce 632,8nm a 543nm transformované na profil Top Hat	47
11.4.2 Závěr	54
11.5.1 Stanovení rozložení relativní variance optické intenzity v profilu svazku	55
11.5.2 Závěr	57
11.6. Laserové diody 405nm a 635nm	58
11.7. Stanovení optimálního tvaru laserového svazku pro turbulentní atmosféru	61
12. Závěr	62
13. Literatura	63
14. Použité měřicí přístroje	64
15. Seznam použitých symbolů	65
16. Seznam příloh	66

Seznam obrázků:

Obr.č.1: Kaskádní model vzdušných vírů	13
Obr.č.2: Přenosový model	14
Obr.č.3: Teplotní model atmosféry	15
Obr.č.4: Závislost relativní variance optické intenzity na parametru beta	16
Obr.č.5: Gaussův profil laserového svazku	17
Obr.č.6: Mechanismus převodu Gaussova profilu svazku na profil Top Hat	19
Obr.č.7: Změna tlaku v Brně ze dne 1. na 2. prosince	22
Obr.č.8: Změna teploty v Brně ze dne 1. na 2. prosince	22
Obr.č.9: Model optické linky s a bez turbulencí	28
Obr.č.10: Model pracoviště	28
Obr.č.11: Zapojení pracoviště	29
Obr.č.12: Pracoviště využívající profilometr	30
Obr.č.13: Obrázek zobrazený pomocí profilometru pro laser He-Ne 632,8nm zobrazující laserový svazek a jeho horizontální a vertikální profil. Tento obrázek byl zachycen po průchodu svazku prostředím bez turbulencí	30
Obr.č.14: Zapojení pracoviště pro dané detektory (spektrometr a P – metr)	31
Obr.č.15: Obrázek zobrazený pomocí profilometru pro laser He-Ne 632,8nm zobrazující laserový svazek a jeho horizontální a vertikální profil. Tento obrázek byl zachycen po průchodu svazku prostředím bez turbulencí	38
Obr.č.16: Obrázek zobrazený pomocí profilometru pro laser He-Ne 543nm zobrazující laserový svazek po transformaci na Top Hat a jeho horizontální a vertikální profil. Tento obrázek byl zachycen po průchodu svazku prostředím bez turbulencí	47
Obr.č.17: Mezikruží pro stanovení rozložení relativní variance optické intenzity	55
Obr.č.18: Stanovení rozložení relativní variance optické intenzity	55
Obr.č.19: Ideální profil svazku do turbulentní atmosféry, tzn. ideální kruhově orientovaný Top Hat svazek	61

Seznam tabulek:

Tab.č.1: Míra turbulencí vyjádřená pomocí strukturního parametru	14
Tab.č.2: Vypočítané hodnoty turbulentního útlumu v závislosti na délce přenosové trasy, vlnové délce laseru a řádu strukturního parametru	26
Tab.č.3: Průměrné teploty pro jednotlivá turbulentní prostředí	29
Tab.č.4: Naměřené a vypočítané parametry svazku He-Ne 632,8 nm pro různé stupně turbulencí	32

Seznam grafů:

Graf.č.1: Závislost strukturního parametru v závislosti na nadmořské výšce pro denní a noční model	21
Graf.č.2: Rozsah změn strukturního parametru ze dne 1. na 2. Prosince vypočítaný ze změn tlaku a teploty v daných hodinách	22
Graf.č.3: Závislost útlumu Advekční mlhy na viditelnosti vypočítané pro laser He-Ne 632,8 nm	24
Graf.č.4: Závislost útlumu Radiační mlhy na viditelnosti vypočítané pro laser He-Ne 632,8 nm.....	24
Graf.č.5: Závislost útlumu na míře sněžení vypočítané pro laser He-Ne 633nm	25
Graf.č.6: Závislost útlumu na délce spoje vzhledem k řádu strukturního parametru pro laser He-Ne 633 nm	27
Graf.č.7: Závislost útlumu na délce spoje vzhledem k vlnové délce pro strukturní parametr $C_n^2 = 10^{-14}$	27
Graf.č.8: Změna intenzity a profilu svazku způsobené průchodem laserového svazku různými stupni turbulentního prostředí	32
Graf.č.9: Závislost změny intenzity svazku na stupni turbulentního prostředí.....	33
Graf.č.10: Změna výkonu v čase pro prostředí bez turbulencí	34
Graf.č.11: Změna výkonu v čase pro turbulentní prostředí T 6	34
Graf.č.12: Naměřené hodnoty výkonu pro jednotlivé stupně turbulentního prostředí .	35
Graf.č.13: Zobrazení relativní variance optické intenzity kde pro výpočet bylo použito 100% intenzitního profilu laserového svazku	36
Graf.č.14: Zobrazení relativní variance optické intenzity kde pro výpočet bylo použito 98,82% intenzitního profilu laserového svazku	37
Graf.č.15: Změna profilu laserového svazku He-Ne 543nm po průchodu prostředím s různou mírou turbulencí	38
Graf.č.16: Změna profilu laserového svazku He-Ne 632,8nm po průchodu prostředím s různou mírou turbulencí	39
Graf.č.17: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu prostředím bez turbulencí pro laser He-Ne 632,8nm .	40
Graf.č.18: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu prostředím bez turbulencí pro laser He-Ne 543nm ...	40
Graf.č.19: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu turbulentním prostředím T 3 pro laser He-Ne 543nm .	41
Graf.č.20: Rozložení relativní variance optické intenzity po průchodu turbulentním prostředím T 3 pro laser He-Ne 543nm (Stejný graf jako 19 ale jiný úhel pohledu)	41
Graf.č.21: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu turbulentním prostředím T 6 pro laser He-Ne 543nm.	42
Graf.č.22: Rozložení relativní variance optické intenzity po průchodu turbulentním prostředím T 3 pro laser He-Ne 543nm (Stejný graf jako 21 ale jiný úhel pohledu)	42
Graf.č.23: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu turbulentním prostředím T 3 pro laser He-Ne 632,8nm	43
Graf.č.24: Rozložení relativní variance optické intenzity po průchodu turbulentním prostředím T 3 pro laser He-Ne 632,8nm (Stejný graf jako 23 ale jiný úhel pohledu)	43

Graf.č.25: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu turbulentním prostředím T 6 pro laser He-Ne 632,8nm	44
Graf.č.26: Rozložení relativní variance optické intenzity po průchodu turbulentním prostředím T 6 pro laser He-Ne 632,8nm (Stejný graf jako 25 ale jiný úhel pohledu)	44
Graf.č.27: Rozložení relativní variance optické intenzity po průchodu laserového svazku turbulentním prostředím o různé míře pro laser 543nm	45
Graf.č.28: Rozložení relativní variance optické intenzity po průchodu laserového svazku turbulentním prostředím o různé míře pro laser 632,8nm	46
Graf.č.29: Profil svazku He-Ne 632,8nm PŘED transformací na Top Hat profil	48
Graf.č.30: Profil svazku He-Ne 632,8nm PO transformací na Top Hat profil	48
Graf.č.31: Změna profilu laserového svazku He-Ne 543nm (transformovaného na Top Hat profil) po průchodu prostředím s různou mírou turbulencí	49
Graf.č.32: Změna profilu laserového svazku He-Ne 632,8nm (transformovaného na Top Hat profil) po průchodu prostředím s různou mírou turbulencí	49
Graf.č.33: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu turbulentním prostředím T 6 pro laser He-Ne 543nm a profilu Top Hat	50
Graf.č.34: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu turbulentním prostředím T 6 pro laser He-Ne 632,8nm a profilu Top Hat	50
Graf.č.35: Rozložení relativní variance optické intenzity po průchodu laserového svazku (profil Top Hat) turbulentním prostředím o různé míře pro laser 543nm	51
Graf.č.36: Rozložení relativní variance optické intenzity po průchodu laserového svazku (profil Top Hat) turbulentním prostředím o různé míře pro laser 632,8nm	52
Graf.č.37: Porovnání relativní variance optické intenzity pro turbulentní prostředí T 6 laseru 632,8nm profilů svazků Top Hat a Gauss	53
Graf.č.38: Porovnání relativní variance optické intenzity pro turbulentní prostředí T 6 laseru 543nm profilů svazků Top Hat a Gauss	53
Graf.č.37: Profil svazku laserové diody 405nm	58
Graf.č.38: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu turbulentním prostředím T 3 pro laserovou diodu 405nm	58
Graf.č.39: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu turbulentním prostředím T 6 pro laserovou diodu 405nm	59
Graf.č.40: Profil svazku laserové diody 635nm	59
Graf.č.41: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu turbulentním prostředím T 3 pro laserovou diodu 635nm	60
Graf.č.42: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu turbulentním prostředím T 6 pro laserovou diodu 635nm	60

1 Úvod

Tato práce se zabývá relativní variancí optické intenzity. Laserový svazek využívaný v optických bezkabelových spojích je ve volném přenosovém prostředí ovlivňován mnoha faktory. Některé z těchto faktorů, jako je mlha, sníh, atd. jsem popsal v této práci a následně vykreslil jejich závislosti do grafů. Podrobněji jsem se zabýval turbulentní atmosférou, modelováním takové atmosféry a zjišťováním jejího vlivu na intenzitní profil laserového svazku. Práce je členěna do několika kapitol.

- V první kapitole jsem popsal druhy turbulencí a příčiny jejich vzniku. Dále zde popisuji vliv turbulencí na laserový svazek, je zde popsán kaskádní model vzdušných virů, Kolmogorův zákon dvou třetin a strukturní parametr indexu lomu.
- V následující kapitole jsem popsal atmosférické přenosové prostředí a seznámil s možnými negativními jevy.
- V další kapitole je matematicky popsána relativní variance optické intenzity a její možný výpočet ze změřených hodnot optické intenzity, nebo ze znalosti jiných hodnot.
- V kapitole číslo pět jsem popsal Gaussův svazek a jeho parametry, jako je výkon svazku, intenzita záření a poloměr svazku, a v kapitole šest jsou krátce uvedeny důvody pro transformaci Gaussova svazku na svazek Top Hat a jeden možný způsob převodu.
- V kapitole sedm a osm se zabývám závislostí strukturního parametru na nadmořské výšce, síle větru, atmosférickém tlaku a teplotě prostředí.
- V následující kapitole je popsán důležitý parametr, útlum vznikající na přenosové trase optické linky. Je zde popsán útlum způsobený mlhou, sněžením a turbulentním prostředím.
- V kapitole deset popisují metodiku měření, kterou jsem používal při měření relativní variance optické intenzity. Jsou zde nákresy jednotlivých pracovišť.
- Poslední kapitola má největší přínos, jsou to výsledky měření vlivu turbulentní atmosféry na laserový svazek, dále pak vypočítaná relativní variance optické intenzity a její rozložení v profilu svazku.

2 Turbulence

Turbulence je obecně nežádoucí jev, který nám zhoršuje přenosové vlastnosti soustavy. Bohužel nelze tento přírodní jev nijak potlačit.

2.1 Dělení a vznik turbulencí^[1]

Termická turbulence

Vzniká v důsledku labilního zvrstvení atmosféry (při proudění studeného vzduchu nad teplejší povrch nebo v důsledku nerovnoměrného ohřevu zemského povrchu). V tomto případě hovoříme o tzv. konvekci, která má výrazný denní chod. Tzn. že termická turbulence se nejvíce uplatňuje v odpoledních a večerních hodinách, kdy je sluncem „rozpálený“ zemský povrch a naopak okolní vzduch je již relativně studený. Naopak tomu je okolo čtvrté hodiny ranní, kdy dochází k vyrovnání teplot.

Dynamická turbulence

Vzniká v oblastech velkého stříhu větru a to jak v horizontálním tak ve vertikálním směru. Nejčastěji je spojena s oblastmi proudového toku.

Mechanická turbulence

Tato turbulence vzniká třením proudícího vzduchu o nerovný zemský povrch. Intenzita mechanické turbulence je závislá na členitosti zemského povrchu a na rychlosti větru. Za zvláštní druh mechanické turbulence se považuje

Orografická turbulence

Vzniká v důsledku proudění vzduchu přes horské překážky. Tato turbulence vzniká i při stabilním zvrstvení vzduchu v důsledku výrazné deformace vzdušného proudu. Tím může docházet za hřebeny hor k výrazným skokovým změnám rychlosti proudění.

^[1] Pro zpracování dané kapitoly byly použity údaje dostupné online
http://www.chmi.cz/meteo/olm/Let_met/Pojmy_2.htm

2.2 Vliv turbulencí na laserový svazek^{[2],[3]}

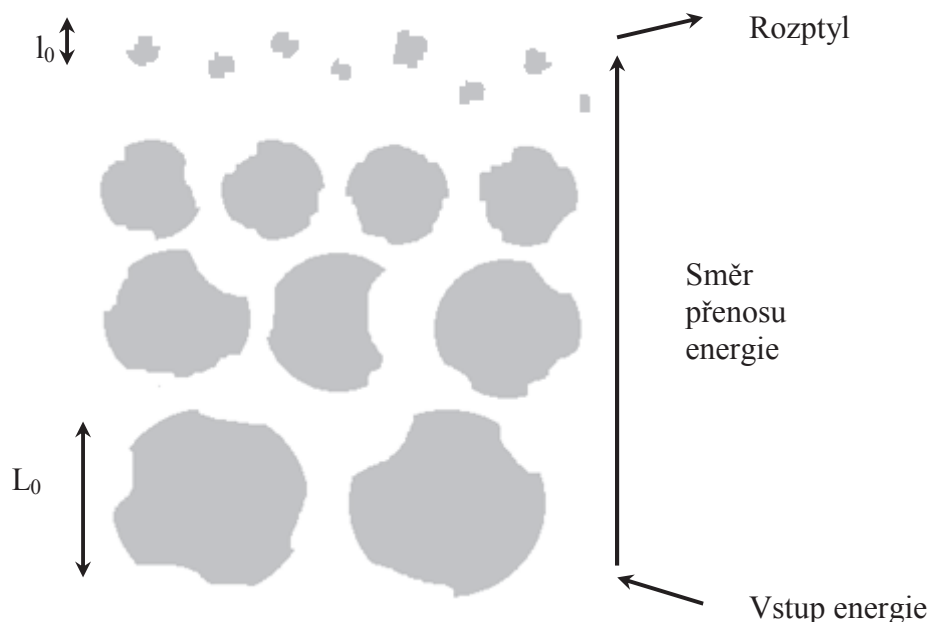
Optický svazek procházející prostředím s turbulencemi určitých intenzit, podléhá energetickým i tvarovým změnám. Změny tvaru svazku (jeho rozšíření nebo odklon) mohou vyvolat změny úrovně přijímaného optického výkonu. Jev turbulence se projevuje především fluktuací přijímaného optického výkonu. Tyto fluktuace mají různou frekvenci a amplitudu. Teplotní turbulence mohou vyvolat změny přijímaného výkonu.

Obecnými jevy, ke kterým během šíření svazku dochází jsou:

- *extinkce* optické intenzity vlivem absorpce nebo rozptylu na molekulách
- *extinkce* optické intenzity vlivem turbulence troposféry
- *fluktuace* optické intenzity vlivem turbulence troposféry
- *fluktuace* optické intenzity působením deště nebo sněhu
- *fluktuace* optické intenzity vlivem deformace tvaru svazku
- *krátkodobé přerušování* svazku

Uvedené jevy působí společně a fluktuace optické intenzity vyvolávají současně extinkci intenzity. Stručně lze uvedené jevy dělit na extinkci optické intenzity, fluktuaci optické intenzity a krátkodobé přerušování svazku (s dobou trvání přibližně 10 ms). Střední koeficient celkové extinkce lze vyjádřit jako součet dílčích koeficientů extinkce odpovídajících jednotlivým jevům (extinkce je aditivní veličina)

V atmosféře se předpokládá existence vzdušných vírů (nehomogenit indexu lomu) ve tvaru koulí. Vlastnosti atmosféry dovolují jen určité rozměry vzdušných vírů. Na obr.č.1 je kaskádní model vzdušných vírů, kde víry o velikosti l_0 nabývají hodnot řádově milimetry a víry o velikosti L_0 nabývají hodnot řádově kilometry.



Obr.č.1: Kaskádní model vzdušných vírů (použito z [3])

^[2] Pro zpracování dané kapitoly bylo použito skriptum: Otakar Wilfert, Skriptum VUT, Fotonika a optické komunikace

^[3] Pro zpracování dané kapitoly byla použita kniha: ANDREWS, L. C., PHILLIPS, R. L. Laser Beam Propagation through Random Media. Bellingham:SPIE, 1998.

V takové atmosféře platí Kolmogorův zákon „dvou třetin“

$$D_n(R) = \langle [n(A,t) - n(B,t)]^2 \rangle = \begin{cases} C_n^2 l_0^{-4/3} R^2, & 0 \leq R \ll l_0 \\ C_n^2 R^{2/3}, & l_0 \ll R \ll L_0 \end{cases} \quad [2.1]$$

kde výraz časově středované veličiny na levé straně se nazývá strukturní funkce indexu lomu, A, B jsou body prostoru, t je čas, C_n^2 je strukturní parametr indexu lomu a L_0 a l_0 je velikost vzdušných vírů.

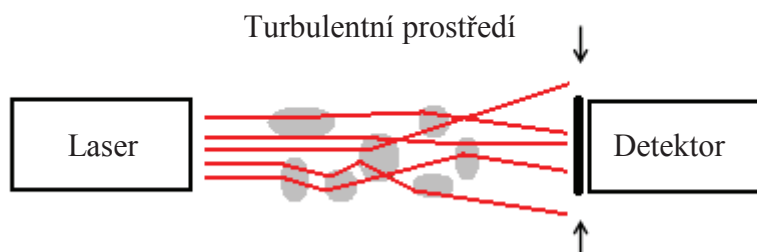
V závislosti na parametru C_n^2 lze určit o jak silnou turbulenci se jedná:

Tab.č.1: Míra turbulencí vyjádřená pomocí strukturního parametru C_n^2

Míra turbulencí	
$C_n^2 = 10^{-18} \cdot m^{-2/3}$	Prostředí bez turbulencí
$C_n^2 = 10^{-14} \cdot m^{-2/3}$	Prostředí se středními turbulencemi
$C_n^2 = 10^{-12} \cdot m^{-2/3}$	Prostředí se silnými turbulencemi

2.3 Změna dráhy laserového svazku na přenosové trase vlivem turbulencí

Na přenosové trase laserového paprsku dochází vlivem turbulencí k odsměrování laserového paprsku. To je způsobeno tím, že paprsek který narazí na nehomogenitu v daném prostředí o jiném indexu lomu, než se paprsek doposud „pohyboval“, dojde k zakřivení paprsku. To má za následek místní pokles výkonu laserového svazku přijatého fotodetektozem na přijímací straně, neboť nejsme schopni přijmout laserový svazek takový, jaký byl vyslán, protože nemáme dostatečnou plochu fotodetektoru. Na obrázku je přenosový model, na němž je vidět vysílací a přijímací strana optické komunikace s možným výskytem turbulencí a svazky odsměrované turbulencemi dopadající mimo plochu detektoru.



Obr.č.2: Přenosový model

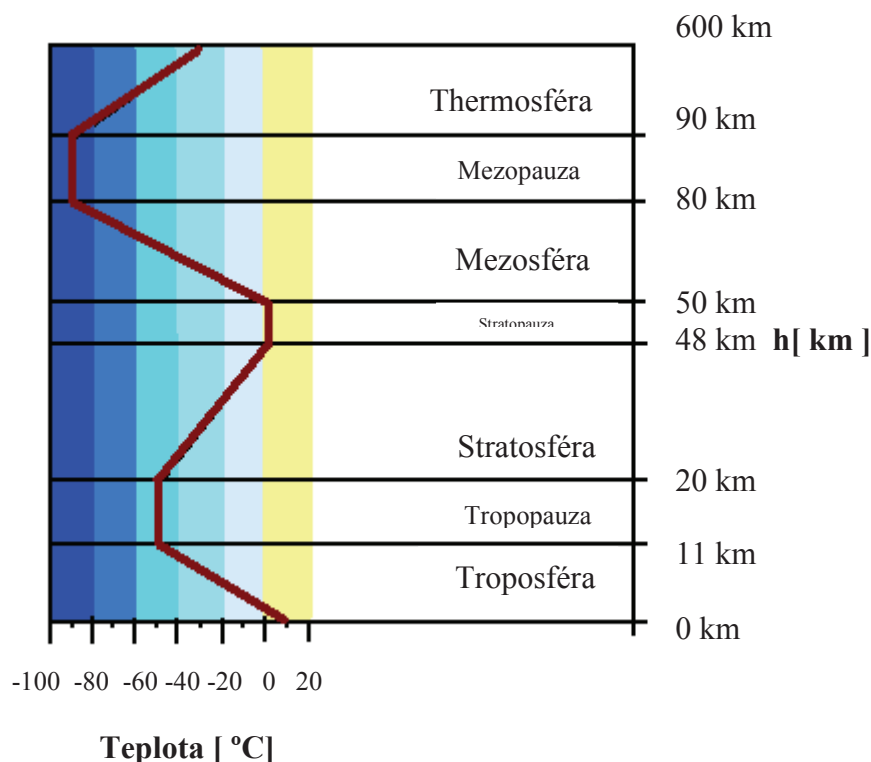
3. Atmosférické přenosové prostředí

Obecně nežádoucími jevy pro optický bezkabelový spoj jsou kromě výše popsaných turbulencí i přírodní jevy jako mlha, déšť, sníh, různé prachové částice. V troposféře jsou i mimo výše uvedených jevů směsi různých plynů, které rovněž mohou působit rušivě na optický spoj, v závislosti na jejich koncentraci. Mezi plyny s největší koncentrací v atmosféře patří CO_2 , O_3 , N_2O , CH_4 . Vlivem těchto plynů vzniká extinkční koeficient který je dán součtem koeficientů rozptylu a absorpce na molekulách a aerosolech. Extinkční koeficient je tedy dán vztahem[5]:

$$\gamma = \alpha_{am} + \alpha_{aa} + \alpha_{rm} + \alpha_{ra} \quad [3.2]$$

kde $\alpha_{am,aa}$ značí absorpci na molekulách a aerosolech a $\alpha_{ra,rm}$ značí rozptyl na molekulách a aerosolech.

Na obrázku č.8 je model atmosféry s rozdělením na jednotlivé vrstvy a teploty odpovídající jednotlivým výškám.



Obr.č.3: Teplotní model atmosféry[5]

^[5] Pro zpracování dané kapitoly byly použity údaje z knihy: ANDREWS, L., PHILLIPS, R., HOPEN, C. Laser Beam Scintillation with Applications. Washington: Spie Press, 2001.

4. Relativní variance optické intenzity^[2]

Náhodné nehomogenity indexu lomu vyvolávají fluktuace fáze i amplitudy procházející vlny. S předpokladem homogenního a stacionárního atmosférického přenosového prostředí a relativně slabé turbulence lze pro relativní varianci optické intenzity odvodit výraz:

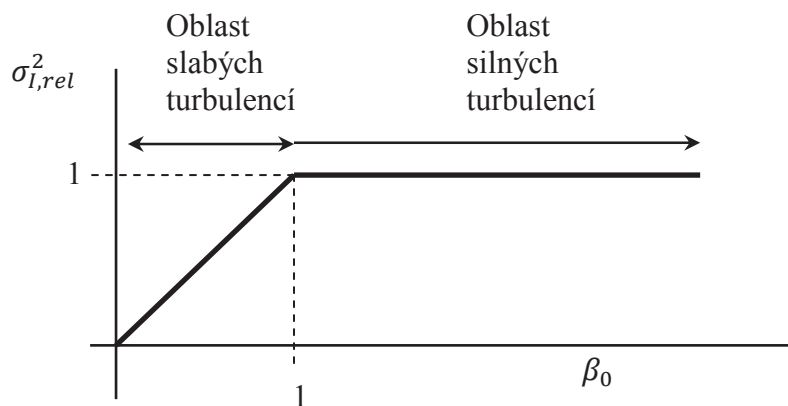
$$\sigma_{I,rel}^2 = \beta_0 = X \cdot C_n^2 \cdot k^{7/6} \cdot L_{APP}^{11/6} \quad [4.1]$$

kde k je vlnové číslo ($2\pi / \lambda$), X je konstanta ($X = 1,23$ pro rovinnou vlnu a $X = 0,5$ pro sférickou vlnu), C_n^2 strukturní parametr a $L_{APP}^{11/6}$ je apereturní vzdálenost, tedy vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem.

Relativní variance optické intenzity je dále definovaná vztahem:

$$\sigma_{I,rel}^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \quad [4.2]$$

kde I je optická intenzita. $\langle I^2 \rangle$ představuje průměrnou hodnotu druhé mocniny jednotlivých vzorků a $\langle I \rangle^2$ představuje průměrnou hodnotu jednotlivých vzorků a to nadruhou. Pro $\sigma_{I,rel}^2 \rightarrow 1$ dochází k jevu nasycení a relativní variance optické intenzity dále neroste. Na obr.3 je graficky znázorněná přibližná závislost relativní variance optické intenzity na parametru β_0

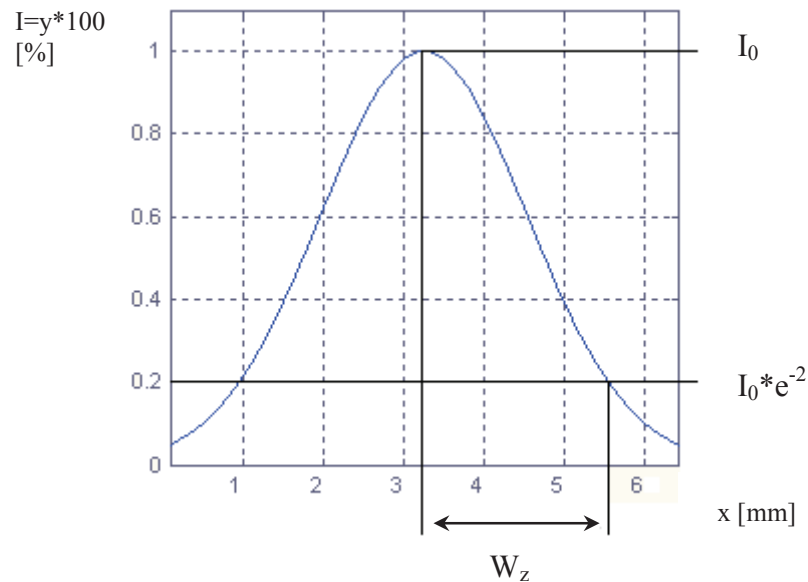


Obr.č.4: Závislost relativní variance optické intenzity na parametru β_0 [2]

^[2] Pro zpracování dané kapitoly bylo použito skriptum: Otakar Wilfert, Skriptum VUT, Fotonika a optické komunikace

5. Gaussův svazek a jeho parametry

Gaussův profil laserového svazku ze zdroje vystupuje jako rovnoběžný (vlnoplocha je rovinná a kolmá na směr šíření). Rozložení intenzity pole po průřezu svazku není konstantní. Intenzita svazku je největší na ose svazku a zmenšuje se k okraji.



Obr.č.5: Gaussův profil laserového svazku

Intenzita záření

Intenzita optického záření je funkcí axiální vzdálenosti z a radiální vzdálenosti $\rho = \sqrt{(x^2 + y^2)}$

$$I(\rho, z) = I_0 \left[\frac{W_0}{W(z)} \right]^2 \exp \left[-\frac{2\rho^2}{W^2(z)} \right] \quad [5.1]$$

Poloměr je definován v místě, kde intenzita dosahuje $1/e^2$ část maximální intenzity. Kromě tohoto parametru je používána ještě pološířka svazku, která je rovna poloměru vynásobenému číslem 1,18 ($\sqrt{2 \cdot \ln 2}$). V kruhu o poloměru w je přenášeno asi 86 % výkonu, o poloměru $1,5 w$ asi 99 % [6].

Výkon svazku

Celkový výkon přenášený svazkem je dán integrálem ze součinu intenzity svazku a plochy jeho příčného průřezu.

$$P = \int_0^\infty I(\rho, z) 2\pi\rho \, d\rho \quad [5.2]$$

odkud

$$P = \frac{1}{2} \cdot I_0 \cdot (\pi \cdot W_0^2) \quad [5.3]$$

Výkon přenášený svazkem je dán součinem poloviny maximální intenzity I_0 a plochy kruhu o poloměru svazku.[6]

Poloměr svazku

V každém příčném průřezu dosahuje intenzita největší hodnoty na optické ose (z). A protože se většina výkonu šíří v oblasti o poloměru $W(z)$, bereme $W(z)$ jako poloměr svazku (též se setkáme s termíny pološířka nebo šířka svazku). Závislost poloměru svazku na podélné souřadnici z je dána vztahem

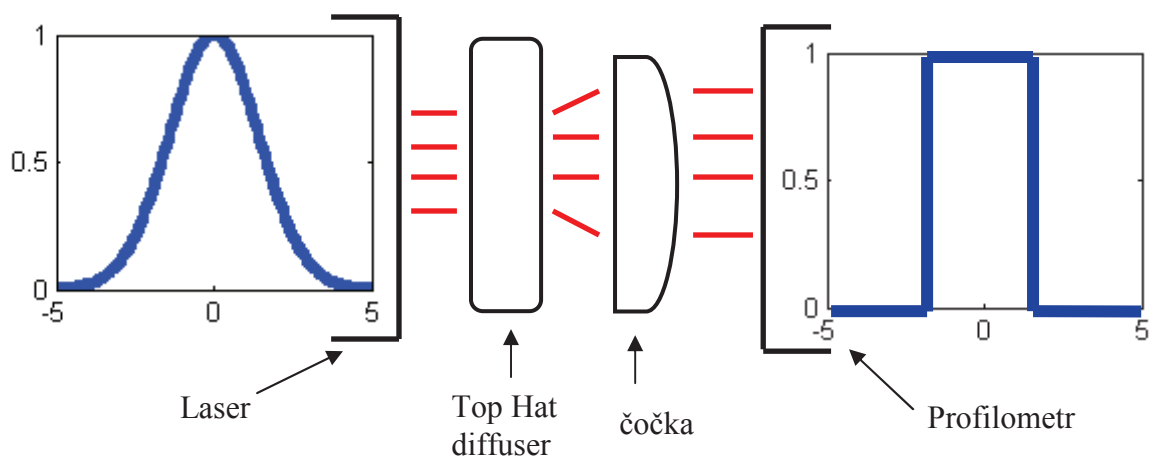
$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + (z / z_0)^2} \quad [5.4]$$

$$\text{kde } z_0 = \frac{\pi \cdot W_0^2}{\lambda} \quad [5.5]$$

V rovině $z = 0$ nabývá minimální hodnoty W_0 . Toto místo se nazývá místem maximálního zúžení středem svazku .[6]

6. Profil Top Hat

Profil Top Hat laserového svazku je mnohem odolnější proti negativním vlivům turbulentní atmosféry. Tato skutečnost je potvrzena měřením v kapitole 11.4.1 této práce. Z tohoto důvodu je vhodné tvarovat původní kruhově orientovaný svazek na „tupí“ profil Gaussova svazku. Ideální profil Top Hat má v celém profilu svazku stejnou hodnotu optické intenzity. Na obr.č.6 je mechanismus tvarování svazku, který jsem používal v laboratoři. Na vstupu je laser He-Ne, za ním následuje Top Hat diffuser. Z tohoto diffuseru vychází původně rovnoběžný svazek jako rozbíhavý, proto je za ním umístěna spojná čočka. Výsledný profil svazku jsem zachycoval pomocí profilometru. Top Hat svazek vytvořený tímto mechanismem nebyl ideální, ale pro mé měření byl dostačující.



Obr.č.6: Mechanismus převodu Gaussova profilu svazku na profil Top Hat[8]

7. Závislost strukturního parametru na nadmořské výšce a síle větru, Hufnagel – Valley, (H-V) model

Míra atmosférických turbulencí vyjádřená pomocí strukturního parametru C_n^2 je závislá na nadmořské výšce, neboť jak jsme si ukázali výše, v různých výškách je jiná teplota. H-V model slouží jak pro výpočet strukturního parametru v závislosti na nadmořské výšce, tak i zahrnuje sílu větru, který rovněž přispívá ke zhoršení strukturního parametru. Pro výpočet slouží rovnice[5]:

$$C_n^2(h) = 0.00594 \cdot (w/27)^2 \cdot (10^{-5} \cdot h)^{10} \cdot \exp(-h/1000) + 2,7 \cdot 10^{-16} \cdot \exp(-h/1500) + A \cdot \exp(-h/100) \quad [7.1]$$

kde h je výška v [m], w je rychlost větru v [m/s], A je nominální hodnota $C_n^2(0)$ v $[m^{-2/3}]$

Atmosférické turbulence vznikají vlivem rozdílných teplot dvou prostředí, neboť například ve večerních hodinách dochází k chládnutí vzduchu na rozdíl tomu, že pohoří atd. mají stále vyšší teplotu a tak dochází k proudění. Nejmenší proudění je tehdy, když dojde k vyrovnání všech teplot jednotlivých subjektů prostředí, což se obvykle děje například v létě nad ránem.

Proto byl stanoven denní a noční model.

Pro DENNÍ model je stanoven strukturní parametr v závislosti na nadmořské výšce[5]:

$$C_n^2(h) = 1,7 \times 10^{-14}, \quad 0 < h < 18,5\text{m}$$

$$C_n^2(h) = 3,13 \times 10^{-13} / h^{1.05}, \quad 18,5 < h < 240\text{m}$$

$$C_n^2(h) = 1,3 \times 10^{-15}, \quad 240 < h < 880\text{m}$$

$$C_n^2(h) = 8,87 \times 10^{-7} / h^3, \quad 880 < h < 7200\text{m}$$

$$C_n^2(h) = 2,0 \times 10^{-16} / h^{1/2}, \quad 7200 < h < 20000\text{m}$$

Pro NOČNÍ model je stanoven strukturní parametr v závislosti na nadmořské výšce[5]:

$$C_n^2(h) = 8,4 \times 10^{-15}, \quad 0 < h < 18,5\text{m}$$

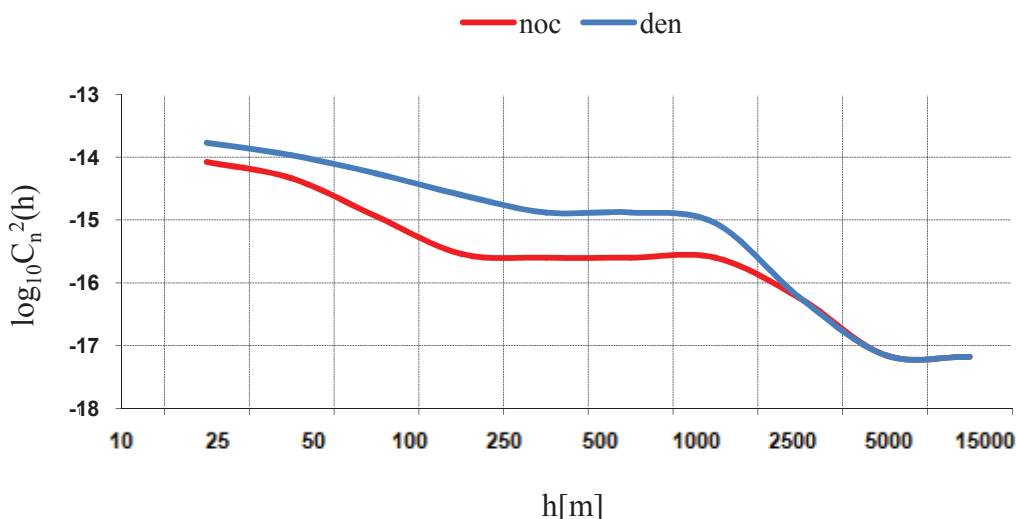
$$C_n^2(h) = 2,87 \times 10^{-12} / h^2, \quad 18,5 < h < 110\text{m}$$

$$C_n^2(h) = 2,5 \times 10^{-16}, \quad 110 < h < 1500\text{m}$$

$$C_n^2(h) = 8,87 \times 10^{-7} / h^3, \quad 1500 < h < 7200\text{m}$$

[5] Pro zpracování dané kapitoly byly použity údaje z knihy: ANDREWS, L., PHILLIPS, R., HOPEN, C. Laser Beam Scintillation with Applications. Washington: Spie Press, 2001.

$$C_n^2(h) = 2,0 \times 10^{-16} / h^{1/2}, \quad 7200 < h < 20000\text{m}$$



Graf.č.1: Závislost strukturního parametru v závislosti na nadmořské výšce pro denní a noční model

Na grafu č.1 je vidět, jak se mění strukturní parametr v závislosti na nadmořské výšce ve dne a v noci. Pro menší výšky je strukturní parametr větší ve dne než v noci, což znamená že ve dne je větší turbulentní rušení. Od jisté výšky se křivky překryjí a dojde k srovnání velikosti míry turbulencí ve dne i v noci. Na ose y je strukturní parametr zlogaritmován, příslušné číslo tedy vyjadřuje řád strukturního parametru.

8. Závislost strukturního parametru na atmosférickém tlaku a teplotě prostředí

Dalším důležitým parametrem, jenž ovlivňuje velikost strukturního parametru C_n^2 je hodnota atmosférického tlaku a teplota daného prostředí.

Tuto závislost popisuje vztah [5]:

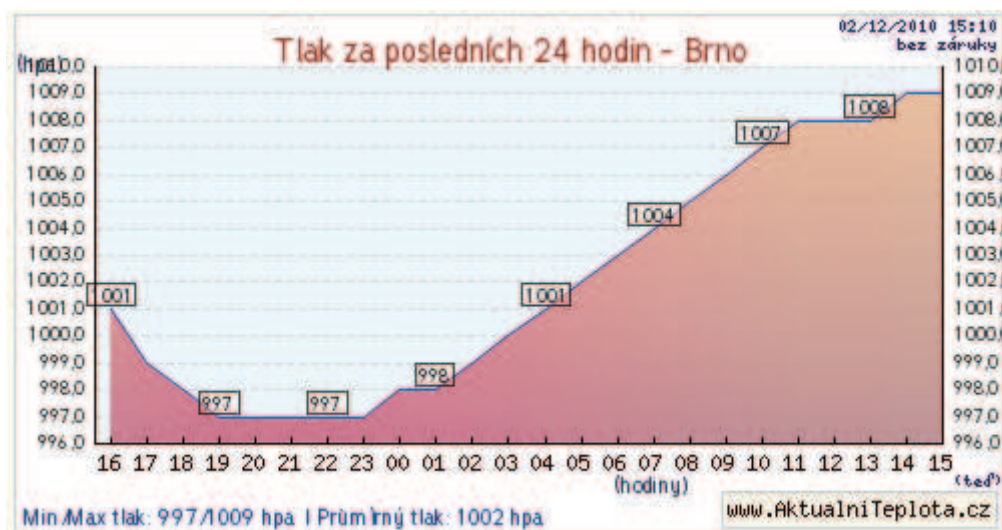
$$C_n^2 = \left(79 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{P}{T^2} \right)^2 \cdot C_T^2 \quad [7.2]$$

kde P je atmosférický tlak v milibarech (zkratka mbar), T je teplota prostředí a C_T^2 je teplotně strukturní konstanta [$\text{deg}^2/\text{m}^{2/3}$]. Tuto konstantu lze vypočítat ze vztahu [5]:

$$D_T(R) = \langle (T_1 - T_2)^2 \rangle = \begin{cases} C_T^2 \cdot l_0^{-4/3} \cdot R^2, & 0 \leq R \ll l_0 \\ C_T^2 \cdot R^{2/3}, & l_0 \ll R \ll L_0 \end{cases} \quad [7.3]$$

kde T_1 a T_2 jsou teploty ve dvou bodech ve vzdálenosti R.

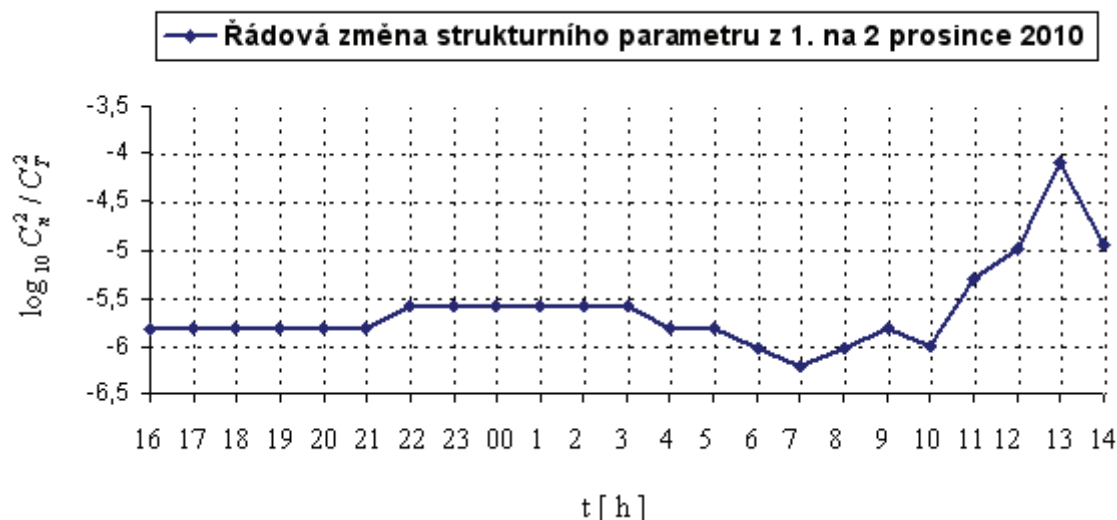
[5] Pro zpracování dané kapitoly byly použity údaje z knihy: ANDREWS, L., PHILLIPS, R., HOPEN, C. Laser Beam Scintillation with Applications. Washington: Spie Press, 2001.



Obr.č.7: Změna tlaku v Brně ze dne 1. na 2. prosince



Obr.č.8: Změna teploty v Brně ze dne 1. na 2. prosince



Graf.č.2: Rozsah změn strukturního parametru ze dne 1. na 2. prosince vypočítaný ze změn tlaku a teploty v daných hodinách

Na grafu č.2 je vidět řádová změna strukturního parametru, v závislosti na teplotě a tlaku pro jednotlivé hodiny. Výpočet jsem provedl od 16 hod. 1. prosince do 14 hod. 2. prosince. Na ose y je strukturní parametr zlogaritmován a tak jednotlivé hodnoty přímo vyjadřují řád strukturního parametru. Jelikož je C_T^2 konstantou, určuje konečný řád strukturního parametru. Grafem č.2 chci ukázat, jak teplota a tlak ovlivňuje míru turbulencí. Proto jsem se nezabýval konstantou C_T^2 , výpočet je tak jednodušší. Z tohoto důvodu není na ose y strukturní parametr danou konstantou násoben. Graf ukazuje, že v příslušném období došlo k rozsahu řádových změn strukturního parametru o 2,25 řádu a to i přesto, že nedocházelo k přílišnému výkyvu teplot.

9. Útlum na přenosové trase optické linky

Útlum na přenosové trase optické linky je způsoben mnoha faktory. Mezi nejhorší faktory patří mlha, déšť, sníh a atmosférické turbulence.

9.1 Útlum způsobený mlhou:

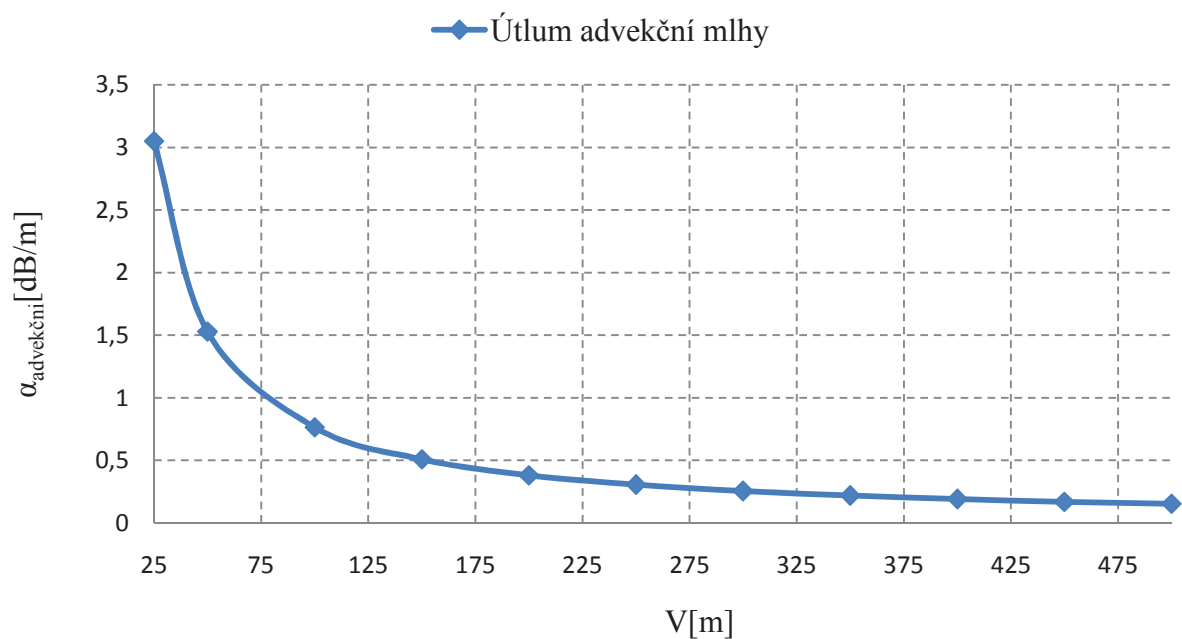
Obecně vzniká mlha vlivem odpařování vodních par a jejich přílišnou koncentrací na určitém území. Pro výpočet útlumu způsobeného mlhou se používají dva modely. První model při výpočtu uvažuje Advekční mlhu a druhý mlhu Radiační. Advekční mlha vzniká, jestliže se vlivem frontálního proudění dostává teplý mořský vzduch nad studenou zemskou plochu. Teplý vzduch se postupně ochlazuje a tím se vzduch prosycuje vodními párami. Tento jev může nastat v kterékoliv denní době a může dosahovat až několik stovek metrů výšky. Druhý typ mlhy Radiační, vzniká vlivem nočního ochlazování vzduchu i přesto, že zemský povrch je stále poměrně teplý. Pro vznik této mlhy je důležité, aby byl maximálně jen velmi slabý vítr, jinak by nedošlo k nasycení vodními párami. Míra mlhy se vyjadřuje pomocí viditelnosti. Za velmi silnou mlhu se považuje mlha s viditelností do 50m, hustá mlha je do viditelnosti 200m, mlha se považuje do viditelnosti 500m a jakýkoliv „opar“ nad 500m viditelnosti se za mlhu nepovažuje.

Útlum Advekční mlhy^[7]:

$$\alpha_{ad} = \frac{0,11478 \cdot \lambda + 3,8367}{V} \quad [8.1]$$

kde λ [nm] je vlnová délka a V [m] je viditelnost.

^[7] Pro zpracování dané kapitoly byly použity údaje dostupné online: Propagation of optical and infrared waves in the atmosphere. Al Naboulsi 1,2 M., Sizun H.1, de Fornel F.2
[www.ursi.org/Proceedings/ProcGA05/pdf/F01P.7\(01729\).pdf](http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA05/pdf/F01P.7(01729).pdf)

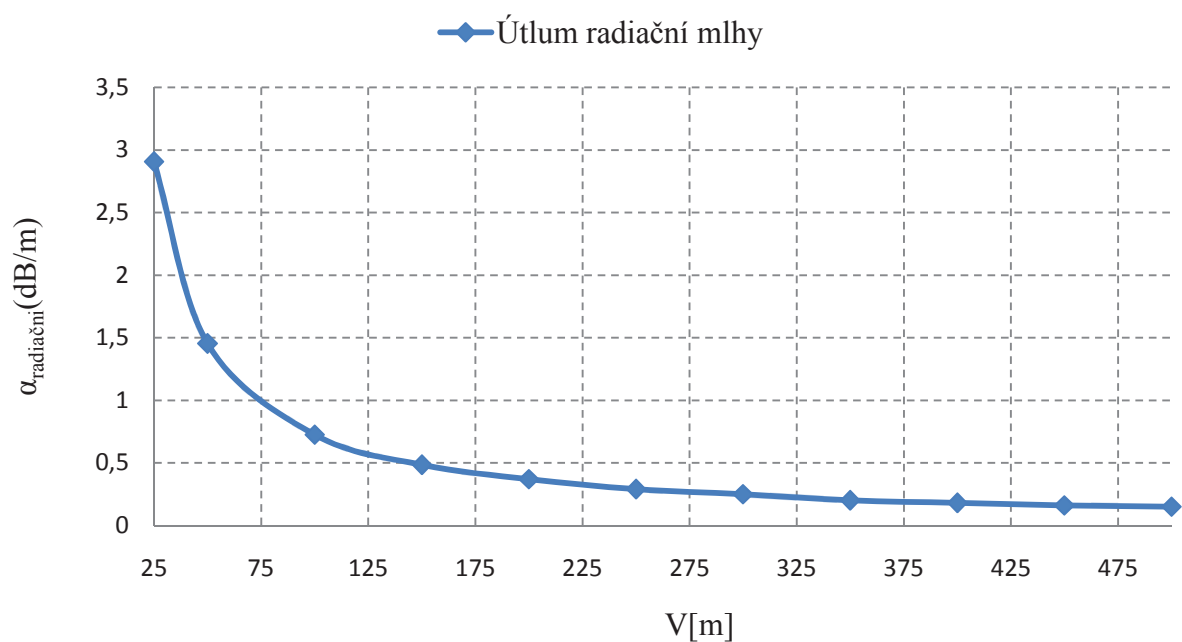


Graf.č.3: Závislost útlumu Advekční mlhy na viditelnosti vypočítané pro laser He-Ne 632,8 nm

Útlum Radiační mlhy[7]:

$$\alpha_{\text{Rad}} = \frac{0,18126 \cdot \lambda^2 + 0,13709 \cdot \lambda + 3,8367}{V} \quad [8.2]$$

kde jako v předchozím případě je λ [nm] vlnová délka a V [m] je viditelnost.



Graf.č.4: Závislost útlumu Radiační mlhy na viditelnosti vypočítané pro laser He-Ne 632,8 nm

Na grafu.č.3 je závislost útlumu Advekční mlhy v závislosti na viditelnosti. Je vidět, jak se mění míra útlumu s rostoucí viditelností. Od viditelnosti nad 150m má útlum pozvolný pokles, zatímco do viditelnosti 150m má útlum prudký pokles s rostoucí viditelností.

Na grafu č.4 je závislost Radiační mlhy v závislosti na viditelnosti. Opět jako u Advekční mlhy je největší útlum do viditelnosti 150m. Nad tuto viditelnost se útlum mění pozvolně.

9.2 Útlum způsobený sněžením^[7]

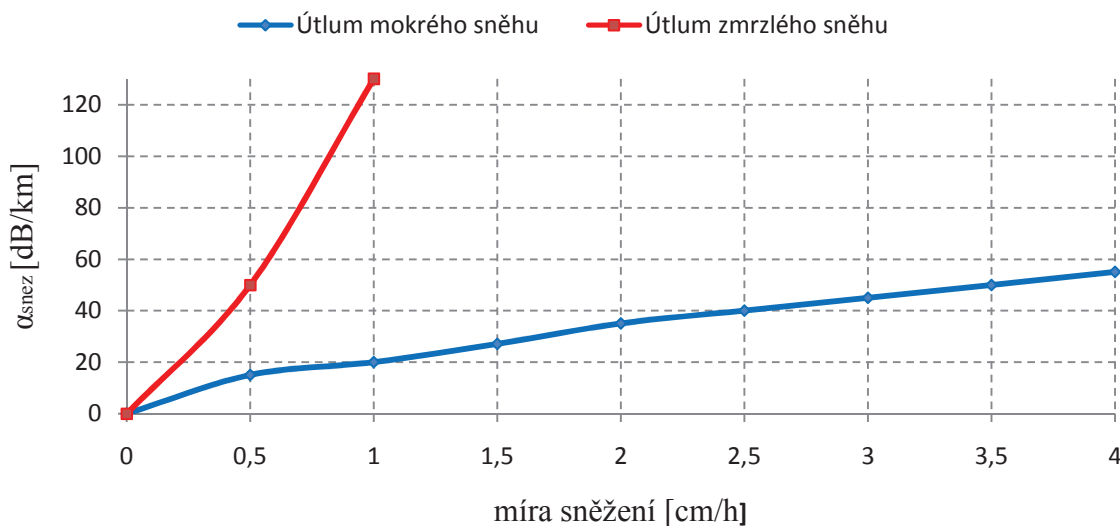
Útlum způsobený sněžením je závislý na typu sněhu. Obecně je útlum vyvolaný sněžením definován jako:

$$\alpha_{snez} = a \cdot S^b [dB / km] \quad [8.3]$$

kde a je konstanta mokrého nebo zmrzlého sněhu, b je konstanta a S [mm/h] je míra sněžení.

Pro mokrý sníh platí: $a = 0,0001023 \lambda_{nm} + 3,7855466$ $b = 0,72$

Pro zmrzlý sníh platí: $a = 0,0000542 \lambda_{nm} + 5,4958776$ $b = 1,38$



Graf.č.5:Závislost útlumu na míře sněžení vypočítané pro laser He-Ne 632,8nm

^[12] Pro zpracování dané kapitoly byly použity údaje dostupné online: Propagation of optical and infrared waves in the atmosphere. Al Naboulsi1,2 M., Sizun H.1, de Fornel F.2
[www.ursi.org/Proceedings/ProcGA05/pdf/F01P.7\(01729\).pdf](http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA05/pdf/F01P.7(01729).pdf)

9.3 Útlum způsobený turbulencemi

Turbulentní útlum je způsoben průchodem svazku přes turbulentní prostředí, které je tvořeno různými turbulentními celami s různými strukturními parametry. Pro rovinou vlnu můžeme popsat změnu variance vztahem[7]:

$$\sigma^2 = 23,17 \cdot C_n^2 \cdot k^{7/6} \cdot L_{apereturni}^{11/6} \quad [8.4]$$

přičemž turbulentní peak s peakem amplitudy je roven 4σ , turbulentní útlum je roven 2σ . Výsledný turbulentní útlum je tedy dán vztahem[7]

$$\alpha_{turb} = 2 \cdot \sqrt{23,17 \cdot C_n^2 \cdot k^{7/6} \cdot L_{apereturni}^{11/6}} \quad [8.5]$$

kde α_{turb} vyjadřuje útlum způsobený vlivem turbulentního prostředí, C_n^2 je strukturní parametr indexu lomu, k je vlnové číslo ($2\pi / \lambda$) a $L_{apereturni}$ je vzdálenost mezi vysílacím laserem a přijímacím detektorem.

Tab.č.2: Vypočtené hodnoty turbulentního útlumu v závislosti na délce přenosové trasy, vlnové délce laseru a řádu strukturního parametru

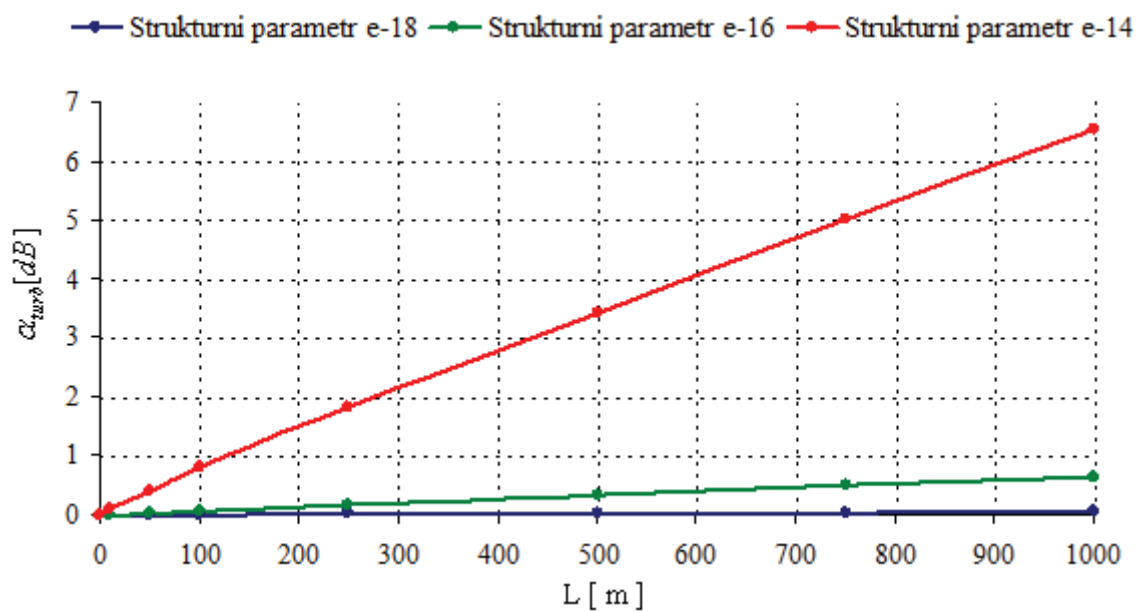
$L_{apereturni}$ [m]	1	10	50	100	250	500	750	1000
α_{turb} [dB]($\lambda=633\text{nm}$, $C_n^2 = 10^{-18}$)	0,0001	0,0009	0,004	0,008	0,018	0,034	0,050	0,065
α_{turb} [dB]($\lambda=633\text{nm}$, $C_n^2 = 10^{-16}$)	0,001	0,009	0,041	0,080	0,180	0,340	0,501	0,650
α_{turb} [dB]($\lambda=633\text{nm}$, $C_n^2 = 10^{-14}$)	0,010	0,090	0,415	0,81	1,82	3,40	5,01	6,53
α_{turb} [dB] ($\lambda=850\text{nm}$, $C_n^2 = 10^{-14}$)	0,00	0,08	0,35	0,66	1,54	2,92	4,22	5,49
α_{turb} [dB]($\lambda=1550\text{nm}$, $C_n^2 = 10^{-14}$)	0,00	0,05	0,24	0,46	1,08	2,05	2,97	3,87

Jelikož platí dle kapitoly 4:

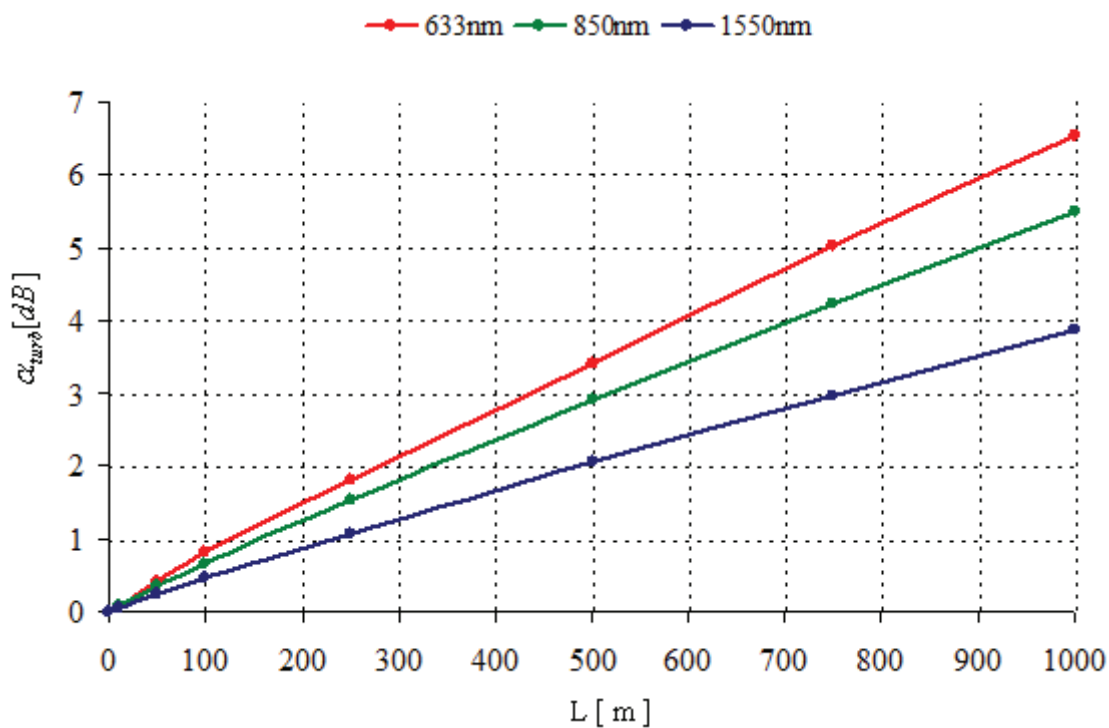
$$\sigma_{I,rel}^2 \leq 1; \sigma_{I,rel}^2 = 0,5 \cdot C_n^2 \cdot k^{7/6} \cdot L_{APP}^{11/6} \Rightarrow 1/\sqrt{0,5} = \sqrt{C_n^2 \cdot k^{7/6} \cdot L_{APP}^{11/6}}$$

pak dosazením do vzorce [8.5] zjistíme maximální útlum turbulencí = 13,6dB.

[7] Pro zpracování dané kapitoly byly použity údaje dostupné online: Propagation of optical and infrared waves in the atmosphere. Al Naboulsi 1,2 M., Sizun H.1, de Fornel F.2
www.ursi.org/Proceedings/ProcGA05/pdf/F01P.7(01729).pdf



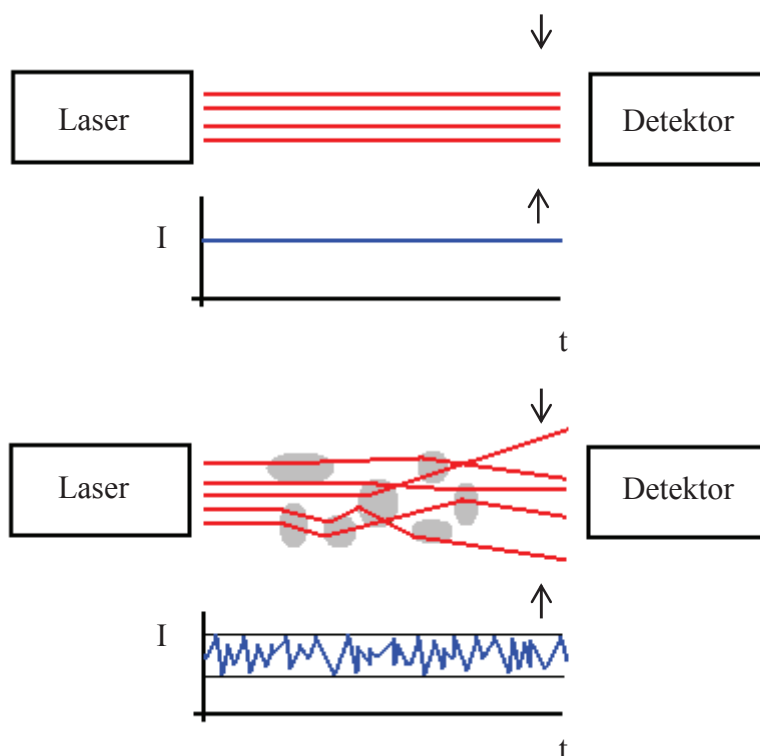
Graf.č.6: Závislost útlumu na délce spoje vzhledem k řádu strukturního parametru pro laser He-Ne 632,8 nm



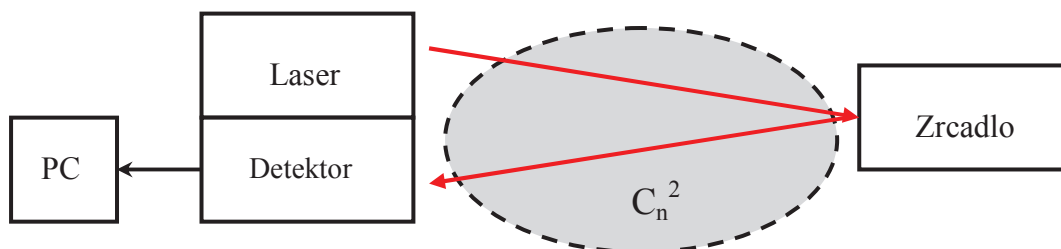
Graf.č.7: Závislost útlumu na délce spoje vzhledem k vlnové délce pro strukturní parametr $C_n^2 = 10^{-14}$

10. Metodika měření

Na obr.č.8 je znázorněn přenos optické linky v ideálním případě a v praxi. Vrchní část představuje ideální model, kde laserový paprsek není nijak narušen a všechny vyzářený výkon je přijat detektorem(nepočítám útlum způsobený vlastním šířením svazku). Druhá část, spodní, již počítá s turbulentními celami, na nichž dochází vlivem nehomogenit, přechodu z prostředí o určitém indexu lomu na prostředí s odlišným indexem lomu k různým zakřivením svazku. Přijímací detektor tedy nezachytí vše jako v prvním případě, neboť část svazku dopadá i mimo detektor. Výsledkem je změna přijímaného výkonu v čase a tedy i změna přijímané intenzity optického svazku.

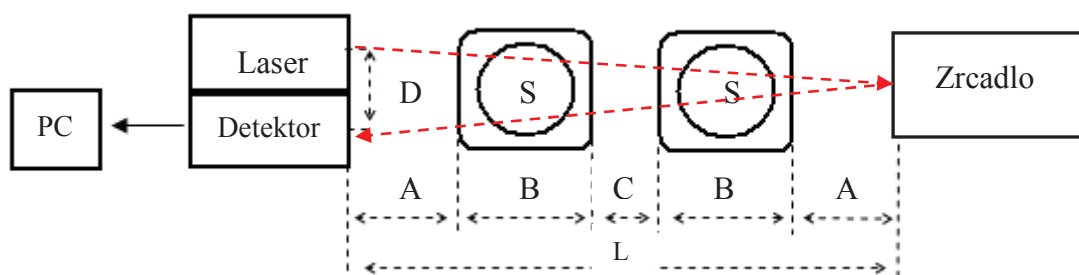


Obr.č.9:Model optické linky s a bez turbulencí



Obr.č.10:Model pracoviště

Na obr.č.9 je nakreslen zjednodušený model pracoviště. Obsahuje laser z něhož svazek míří na zrcadlo, na zrcadle se svazek odrazí a míří na detektor. Pracoviště je takto uspořádáno proto, aby se docílilo delší trasy svazku turbulentním prostředím simulovaným v laboratoři. Strukturální parametr vyjadřuje míru turbulencí.



Obr.č.11: Zapojení pracoviště

Vysvětlivky a vzdálenosti kót:

$A = 20\text{cm}$
 $B = 27\text{cm}$
 $C = 6\text{cm}$
 $L = 100\text{cm}$
 $D = 12\text{cm}$
 $S = 283\text{cm}^2$ (plocha infrazářiče)
 $h = 7\text{cm}$ (není zakresleno, vyjadřuje výšku svazku nad infrazářičem)

Modelování turbulentní atmosféry:

Modelování turbulentní atmosféry jsem prováděl pomocí dvou infrazářičů. Tyto infrazářiče měli 6 stupňů nastavení teplot. Vždy jsem používal stejně nastavené teploty u obou infrazářičů. Jednotlivá turbulentní prostředí jsem označil T 1 – T 6. Jednotlivým stupňům nastavení odpovídali průměrné teploty dle tab.č.3

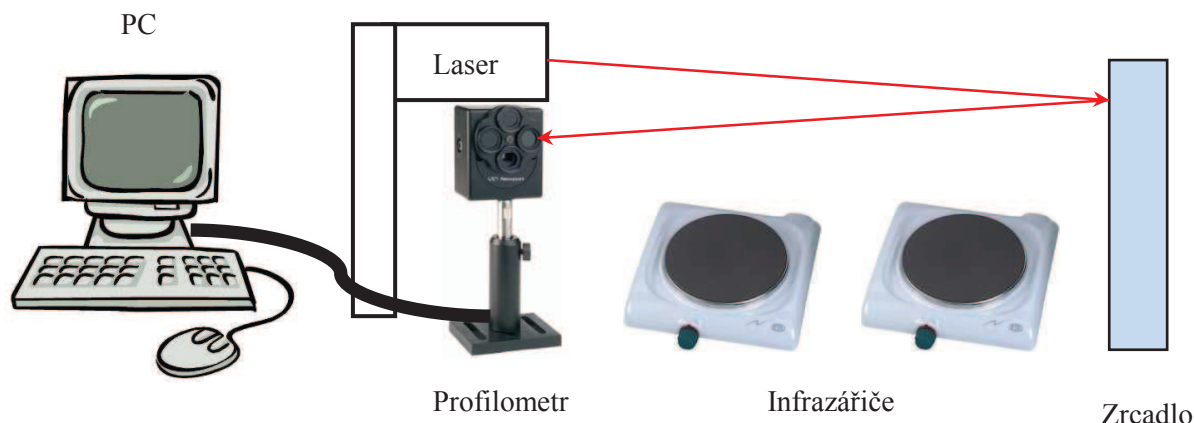
Tab.č.3 Průměrné teploty pro jednotlivá turbulentní prostředí

Bez turbulencí (T 0)	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6
24,5 °C	30,4°C	32,8°C	36,2°C	44°C	52°C	60°C

Skutečná délka dráhy svazku na pracovišti:

Jelikož jsem umístil laser i detektor na jednu stranu tak laserový svazek putuje pod určitým úhlem a výsledná trasa je větší. Pomocí Pythagorovy věty lze spočítat skutečnou délku trasy. Pro jedno rameno to je 100,18cm. Protože svazek putuje po stejné dráze tam i zpět, konečná dráha je dvojnásobná tedy 200,36cm.

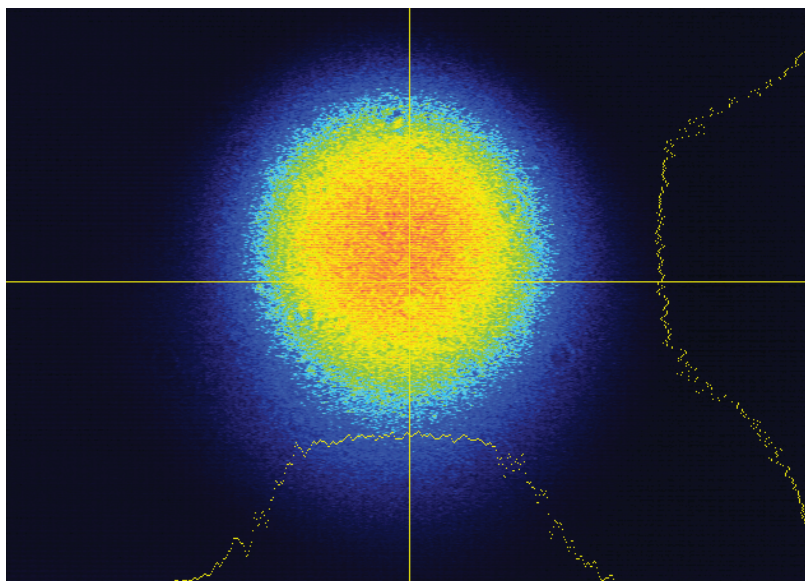
10.1 Pracoviště s profilometrem



Obr.č.12: Pracoviště využívající profilometr

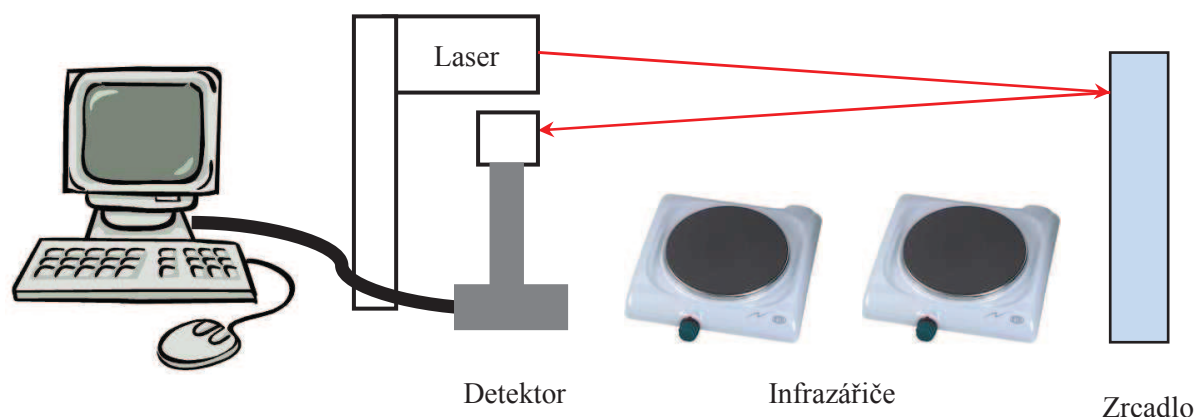
Popis pracoviště:

Na vstupu je použit laser Helium-Neon, jehož paprsek prochází přes turbulence. Pro zajištění delší trasy paprsku turbulentním prostředím je naproti laseru umístěna odrazná plocha (zrcadlo) a paprsek prochází zpět znovu přes turbulence do Laser Beam Profileru(dále profilometr). Tím dosáhneme delší trasy laserového paprsku přes turbulence v laboratoři. Turbulentní prostředí je modelováno dvojicí infrazářičů, na nichž je možno nastavit různé stupně výhřevnost, tedy i různé stupně turbulencí v této práci označené jako T 1 – T 6. Výstup z profilometru je připojen pomocí USB k počítači, kde je možno pomocí příslušného programu, sledovat přijímaný svazek, jenž je podle stupně turbulentního prostředí různě ovlivněn. Naměřená data je možné exportovat pro další práci s naměřenými hodnotami.



Obr.č.13: Obrázek zobrazený pomocí profilometru pro laser He-Ne 632,8nm zobrazující laserový svazek a jeho horizontální a vertikální profil. Tento obrázek byl zachycen po průchodu svazku prostředím bez turbulencí.

10.2 Pracoviště s využitím Spektrometru a měřákem výkonu



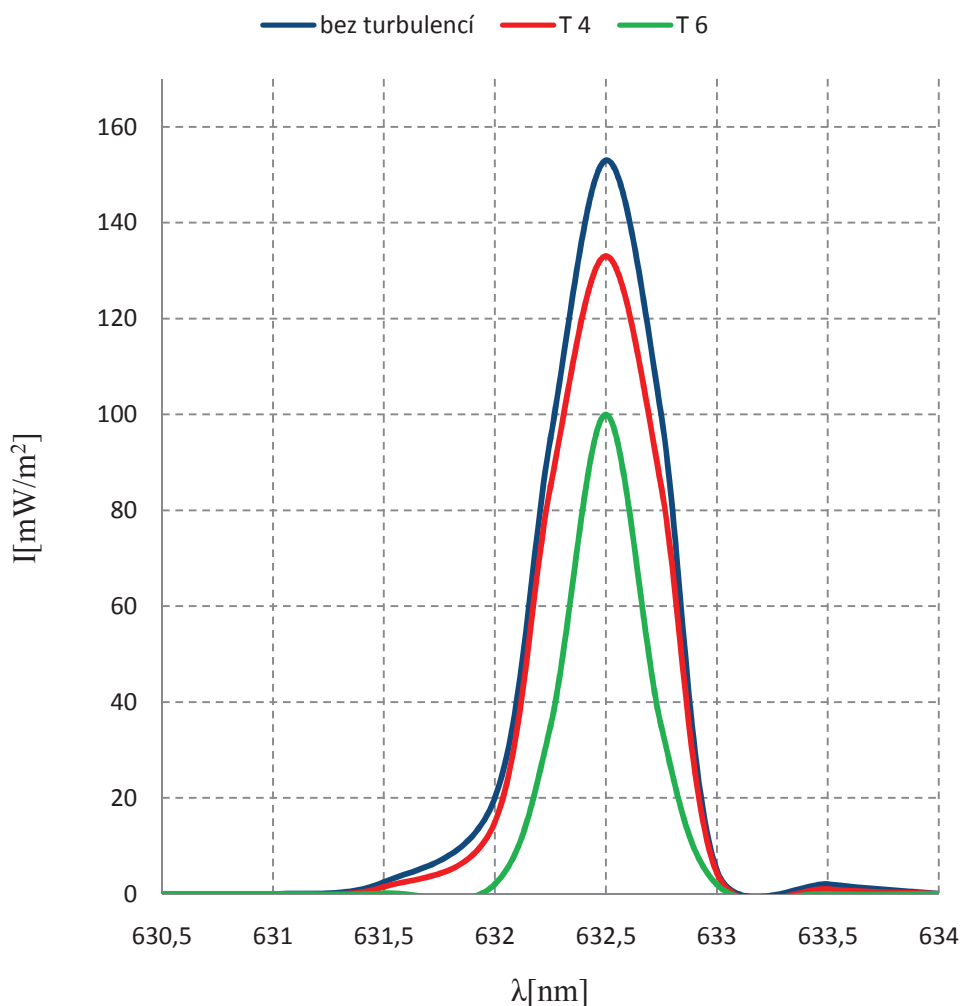
Obr.č.14: Zapojení pracoviště pro dané detektory (spektrometr a P – metr)

Popis pracoviště:

Toto pracoviště je velmi podobné tomu předchozímu. Neobsahuje Profilometr. Profilometr je nahrazen 2 detektory, spektrometrem a měřákem výkonu. Pro každé měření jsou jednotlivé detektory použity samostatně. Před měřák výkonu jsem umístil clonu v níž byl miniaturní otvor, abych detekoval co nejmenší část přijímaného svazku. Spektrometr i měřák výkonu jsem připojil přes USB k počítači, kde jsem pomocí příslušného programu sledoval vliv turbulencí na daný svazek. Jednotlivá rozestavení přístrojů odpovídají rozložení pracoviště dle obr.č.11.

11. Výsledky měření

11.1 Pracoviště s využitím spektrometru

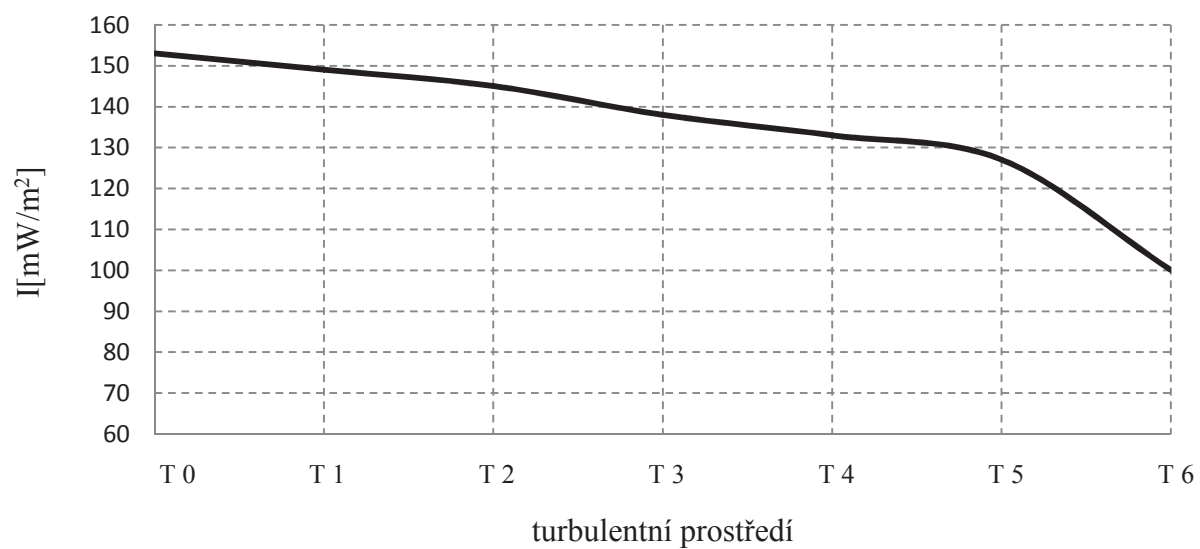


Graf.č.8: Změna intenzity a profilu svazku způsobené průchodem laserového svazku různými stupni turbulentního prostředí

Na graf.č.8 je vidět vliv turbulencí na intenzitu a profil svazku. Prostředí bez turbulencí znamená, že byly oba infrazářiče vypnuty a měly teplotu okolí. V tab.č.4 jsou uvedeny změny parametrů svazku vlivem turbulencí určené výpočtem z naměřených hodnot, nebo přímo odečtené z průběhů jenž zachytil spektrometr Avantes.

Tab.č.4: Naměřené a vypočítané parametry svazku pro laser He-Ne 632,8 nm pro různé stupně turbulencí

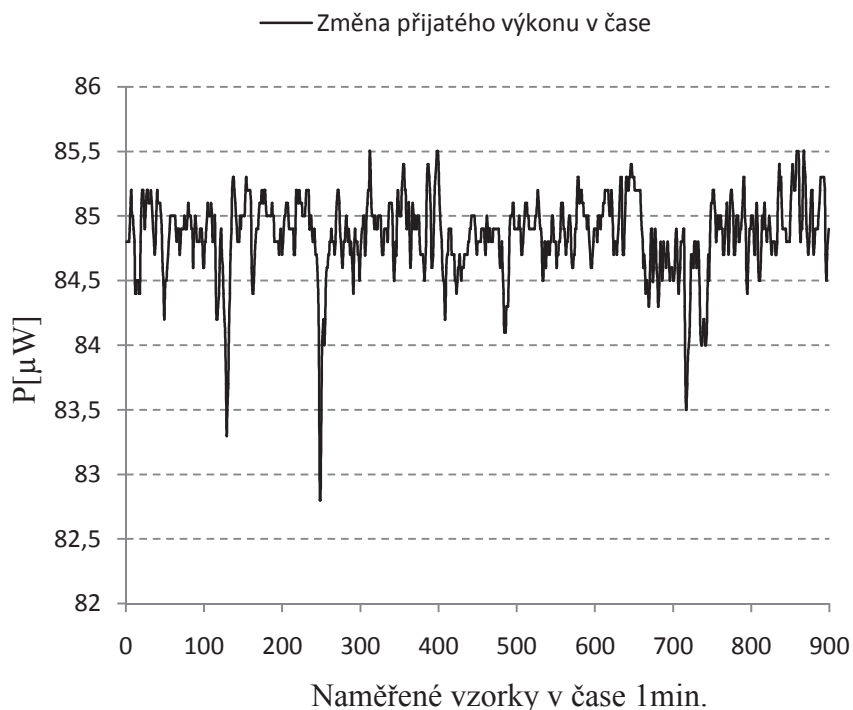
symbol	parametr	bez turbulencí	T 4	T 6
λ [nm]	Vlnová délka	632,5	632,5	632,5
$\Delta\lambda$ [nm]	Šířka spektrální čáry	0,59	0,56	0,49
I_{\max} [mW/m^2]	Intenzita	150	133	100,5



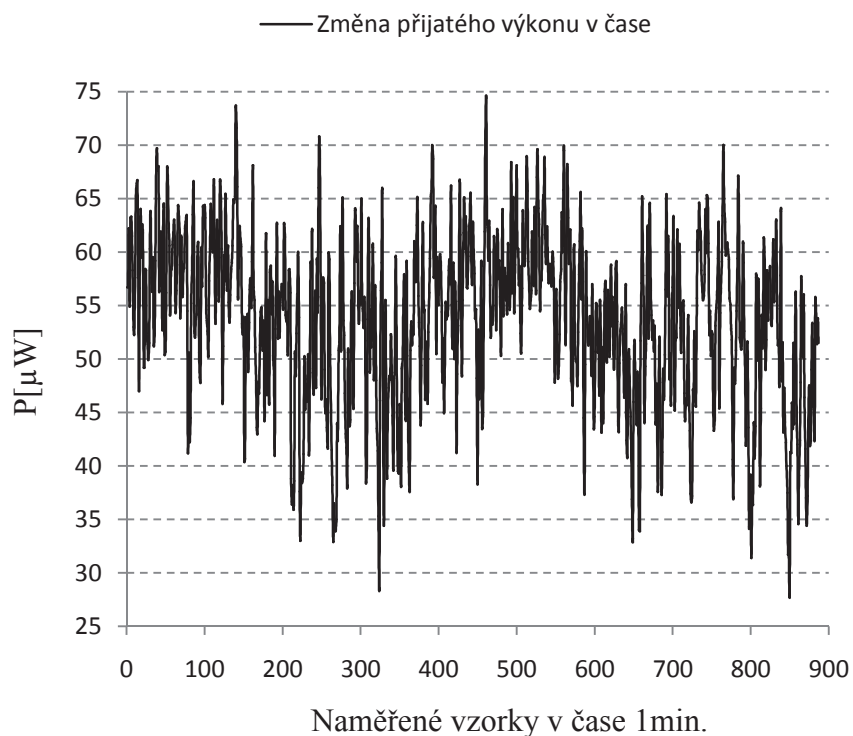
Graf.č.9: Závislost změny intenzity svazku na stupni turbulentního prostředí

11.2 Pracoviště s využitím P-metru

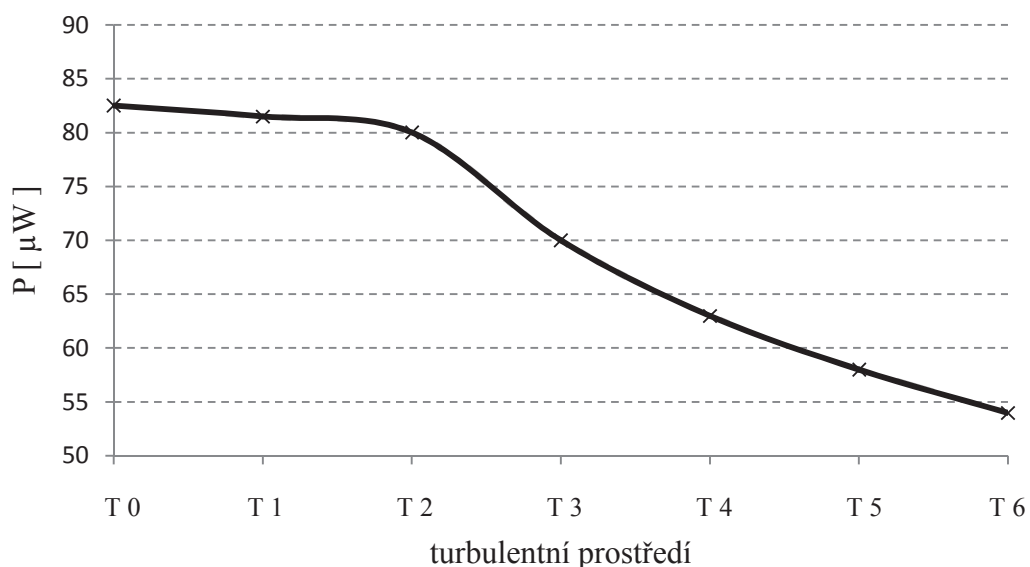
Při tomto měření jsem měřil pouze výkon v malé části svazku. Toho jsem docílil umístěním stínítka před detektor P-metru. Ve stínítku byl otvor vytvořený propíchnutím kroužítka. Výsledky zde demonstrovány jsou platné pro laser 632,8nm.



Graf.č.10: Změna výkonu v čase pro prostředí bez turbulencí



Graf.č.11: Změna výkonu v čase pro turbulentní prostředí T 6



Graf.č.12: Naměřené hodnoty výkonu pro jednotlivé stupně turbulentního rušení

Na grafech č.10 a č.11 je změřený výkon v čase. Graf č.10 představuje přijímaný výkon po průchodu svazku prostředím bez turbulentí. Naopak graf č.11 představuje přijímaný výkon po průchodu svazku turbulentním prostředím stupně T 6. Je vidět, jak zásadní vliv má turbulentní prostředí na přenášený výkon.

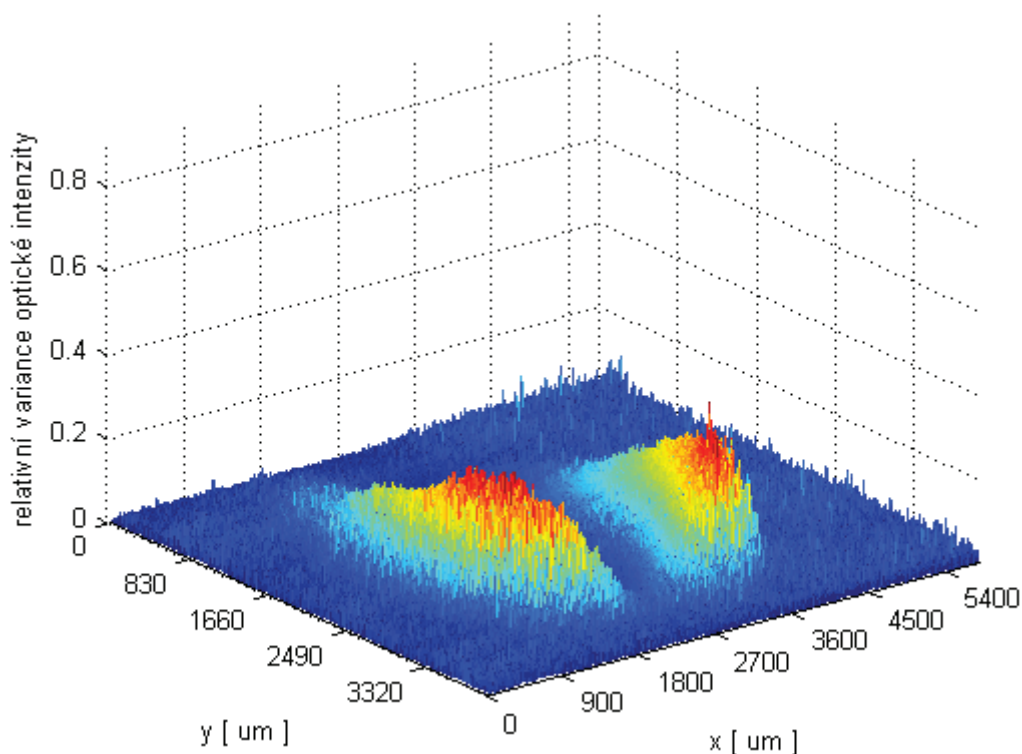
Na grafu č.12 je závislost průměrného přenášeného výkonu na jednotlivých turbulentních stupních. Jednotlivé hodnoty výkonu jsem měřil v 60s úsecích, kde pro každý tento úsek program vyhodnotil 900 vzorků naměřených hodnot v čase. Pro každý turbulentní stupeň jsem toto měření provedl 5-krát. Udaná hodnota v grafu pro každý turbulentní stupeň je dána průměrem 900 vzorků krát 5 měření, tedy ze 4500vzorků.

11.3 Měření relativní variance optické intenzity pomocí profilometru

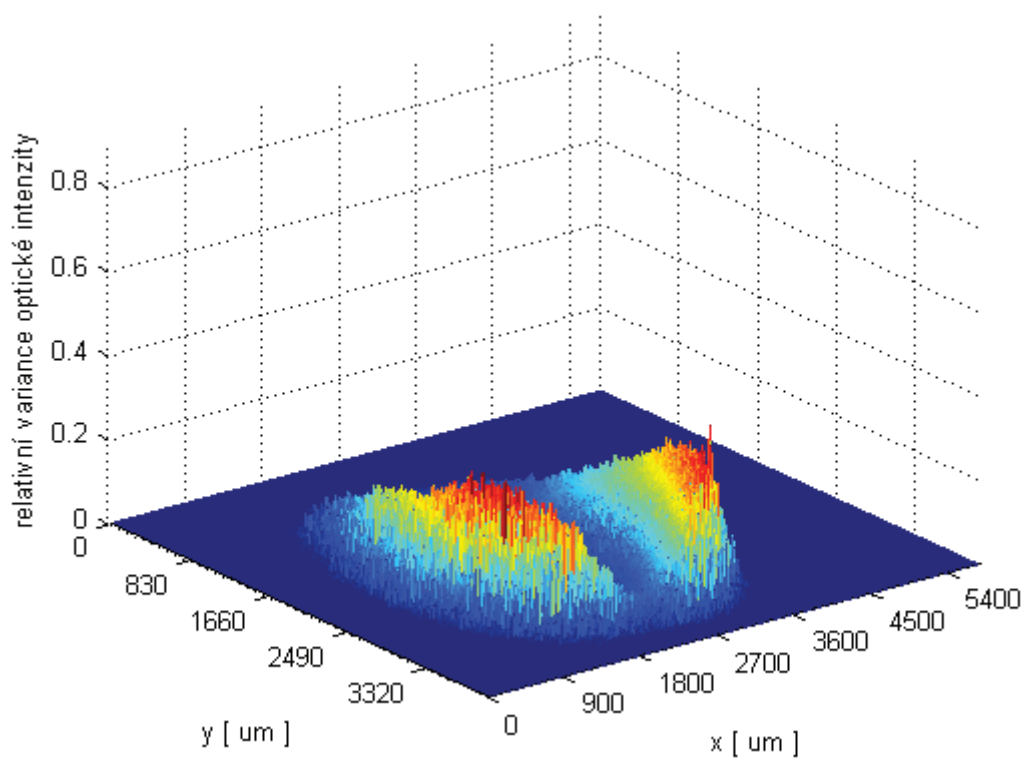
Měření relativní variance optické intenzity jsem rozdělil na tři samostatné části. V první části jsem použil lasery He-Ne 543nm a 632,8nm bez zásahu do jejich profilu svazku. Ve druhé části jsem upravil profil svazku laserů z první části na profil Top Hat a sledoval, jak se změní vliv turbulentního prostředí na takto upravený svazek. Dále jsem porovnával vypočítané relativní variance optické intenzity upraveného a neupraveného profilu laserového svazku. Ve třetí části jsem se zabýval měřením relativní variance optické intenzity laserových diod 405nm a 635nm.

Pro zpracování výsledků jsem používal uložená data ve formátu *.txt která byla v daném formátu zapsaná do matice 307 200 řádků a 3 sloupců. Tyto data reprezentovali hodnoty z ccd snímače 640x480 bodů. Danou matici jsem si přeskládal v programu Matlab do matice 480x640 a vykreslil.. Z takto naměřených profilů jsem počítal v programu Matlab relativní variance optické intenzity. Výpočty jsem prováděl z dvaceti vzorků pro každou simulovanou míru turbulentního prostředí. V příloze tohoto projektu je uveden pro názornost program pro výpočet z 5 vzorků.

Při měření jednotlivých profilů svazku po průchodu turbulentním prostředím o různé míře dochází kromě změření intenzitního profilu svazku i ke změření šumového pozadí. Naměřená matice 640x480 tak obsahuje kromě intenzitního profilu různé hodnoty šumového pozadí, což při výpočtu relativní variance optické intenzity a jejím následném vykreslení zavádí rušivé prostředí. Z tohoto důvodu pro výpočty relativní variance optické intenzity používám 98,82% intenzitního profilu laserového svazku. Tím se „vyčistí“ grafické zobrazení relativní variance optické intenzity což je vidět na následujících dvou grafech.

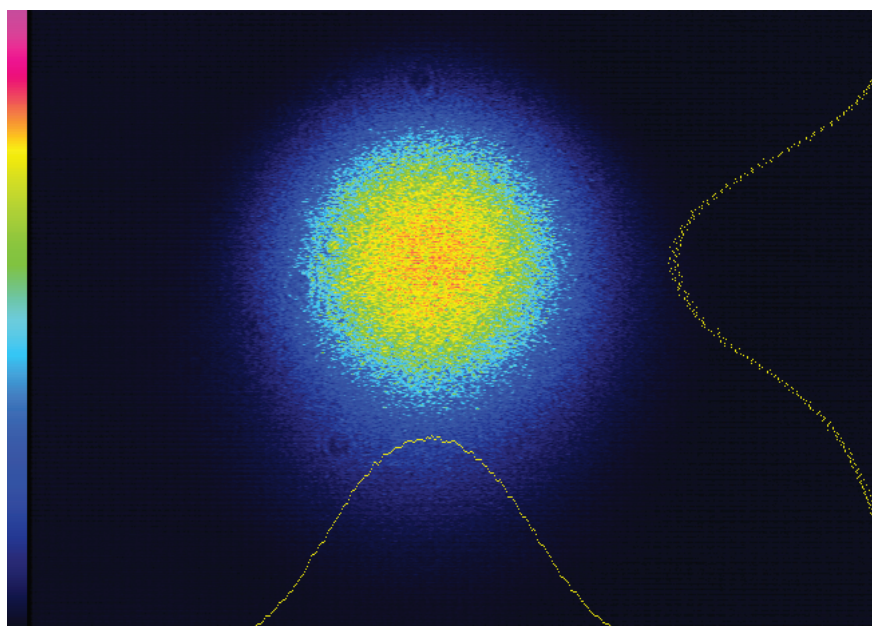


Graf.č.13: Zobrazení relativní variance optické intenzity kde pro výpočet bylo použito 100% intenzitního profilu laserového svazku

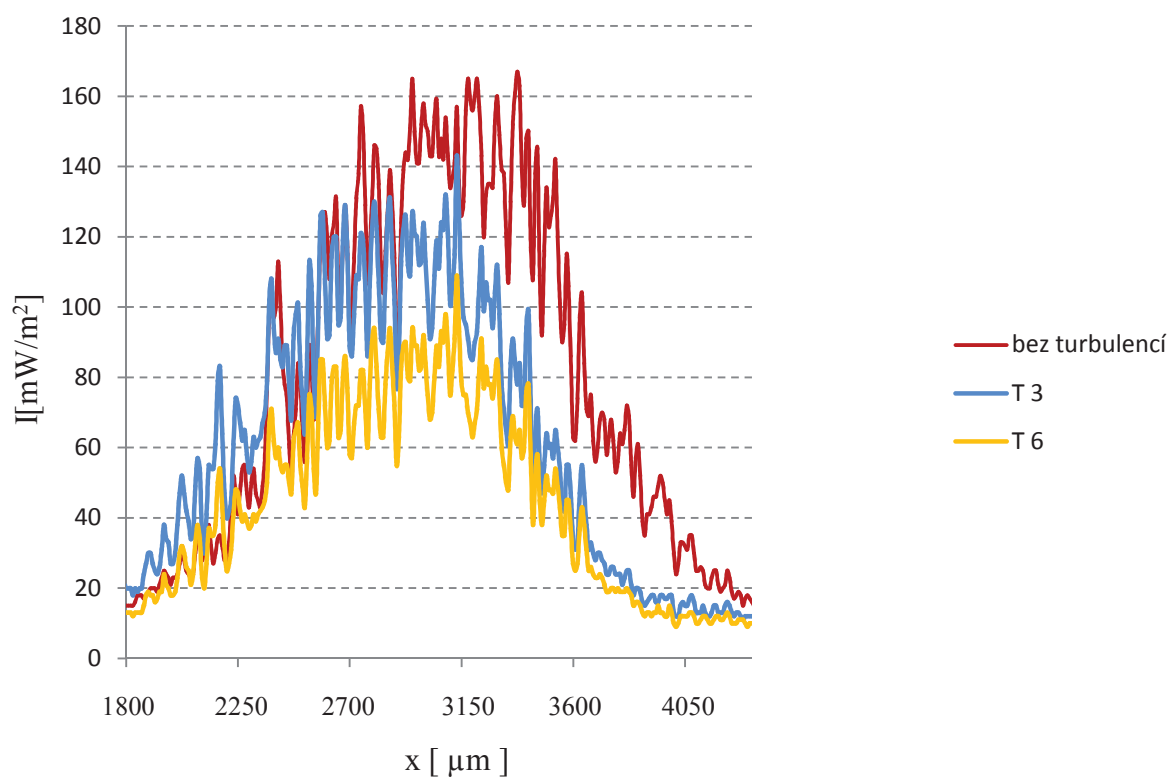


Graf.č.14: Zobrazení relativní variance optické intenzity kde pro výpočet bylo použito 98,82% intenzitního profilu laserového svazku

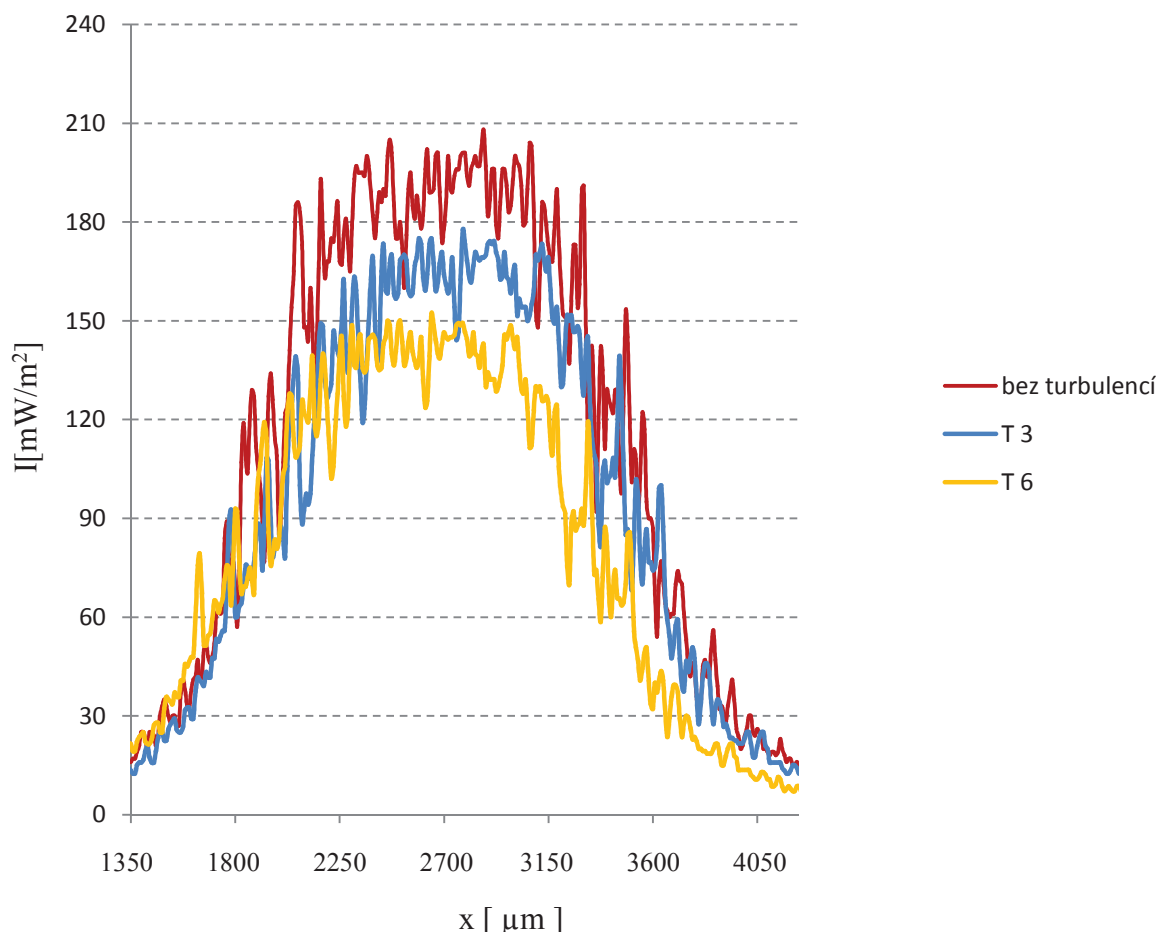
11.3.1 Lasery He-Ne o vlnové délce 632,8nm a 543nm



Obr.č.15: Obrázek zobrazený pomocí profilometru pro laser He-Ne 632,8nm zobrazující laserový svazek a jeho horizontální a vertikální profil. Tento obrázek byl zachycen po průchodu svazku prostředím bez turbulencí



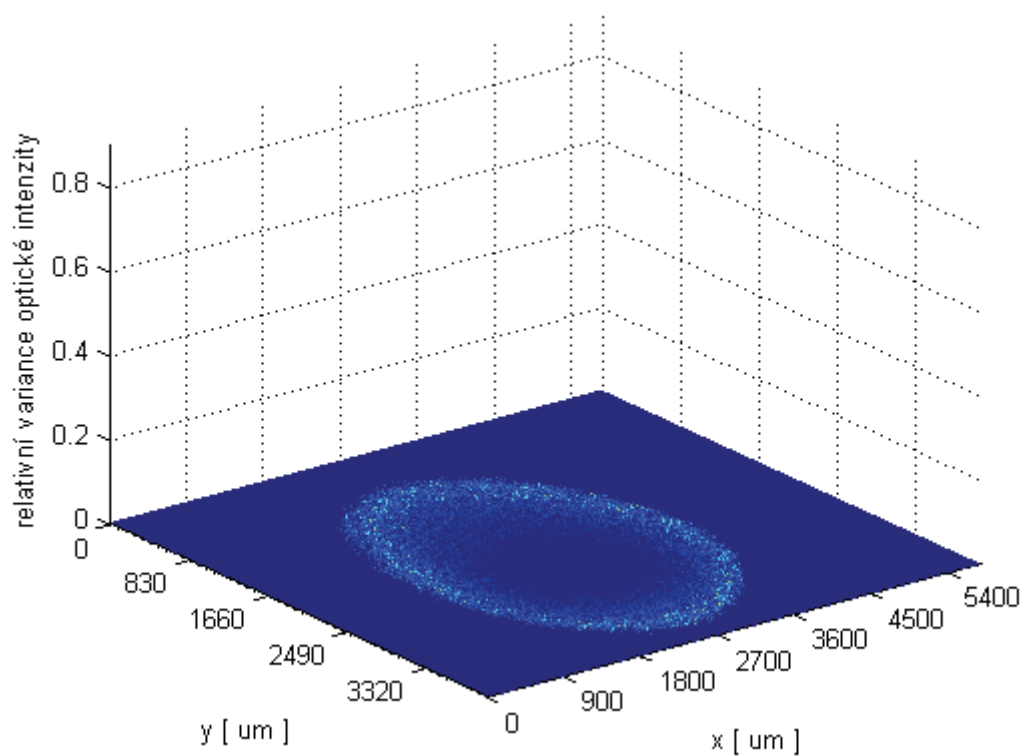
Graf.č.15: Změna profilu laserového svazku He-Ne 543nm po průchodu prostředím s různou mírou turbulencí



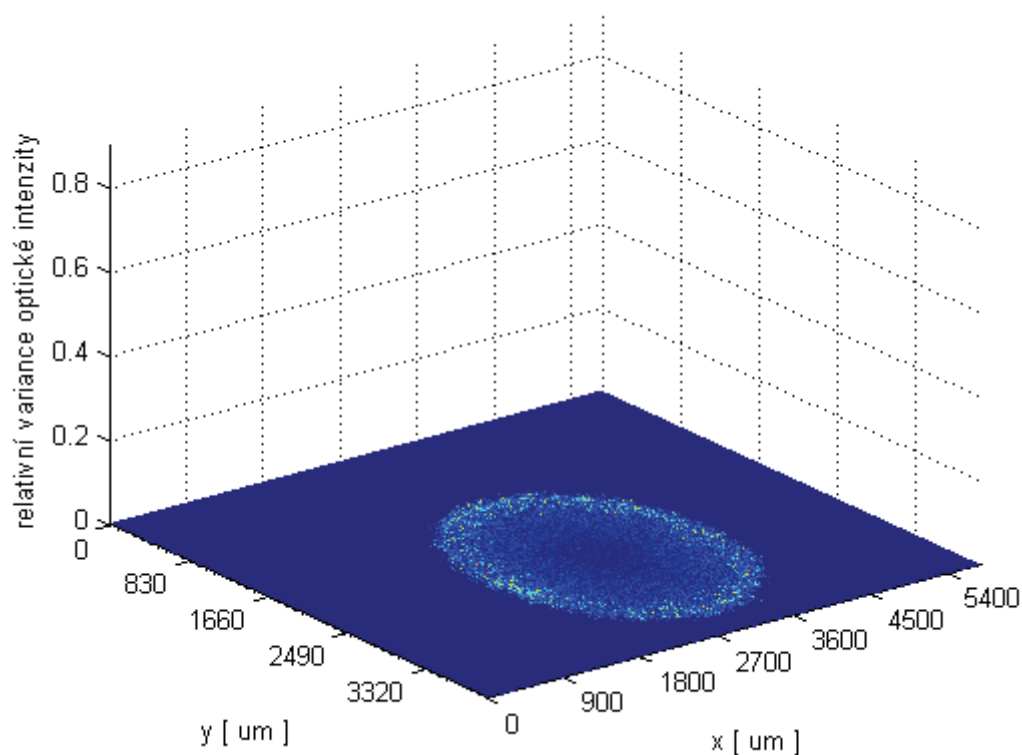
Graf.č.16: Změna profilu laserového svazku He-Ne 632,8nm po průchodu prostředím s různou mírou turbulencí

Na grafech č.15 a č.16 je zobrazena změna profilů laserových svazků He-Ne 543nm a 632,8nm po průchodu turbulentním prostředím o různé míře. Grafy jsem sestavil tak, že jsem vykreslil stejný řádek z matice naměřených vzorků pro oba lasery i různé míry turbulencí. Hnědý průběh značí profil svazku, který neprocházel turbulentním prostředím. Naopak modrý a žlutý průběh jsou profily svazků po průchodu turbulentním prostředím o míře T 3 a T 6. Z grafů je patrné, že laser 632,8nm je odolnější turbulentním vlivům, k větší degradaci svazku došlo u laseru 543nm.

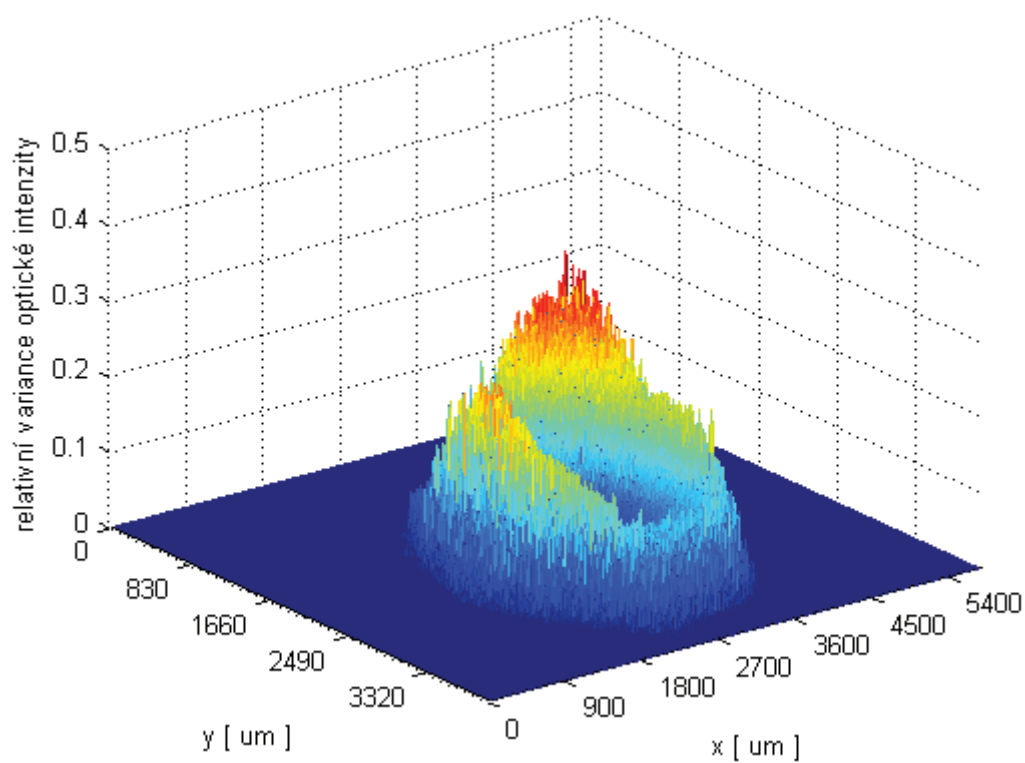
Na následujících stránkách jsou vykresleny grafy relativní variance optické intenzity po průchodu svazku prostředím bez turbulencí a po průchodu svazku turbulentním prostředím o různé míře pro oba lasery ve 3D.



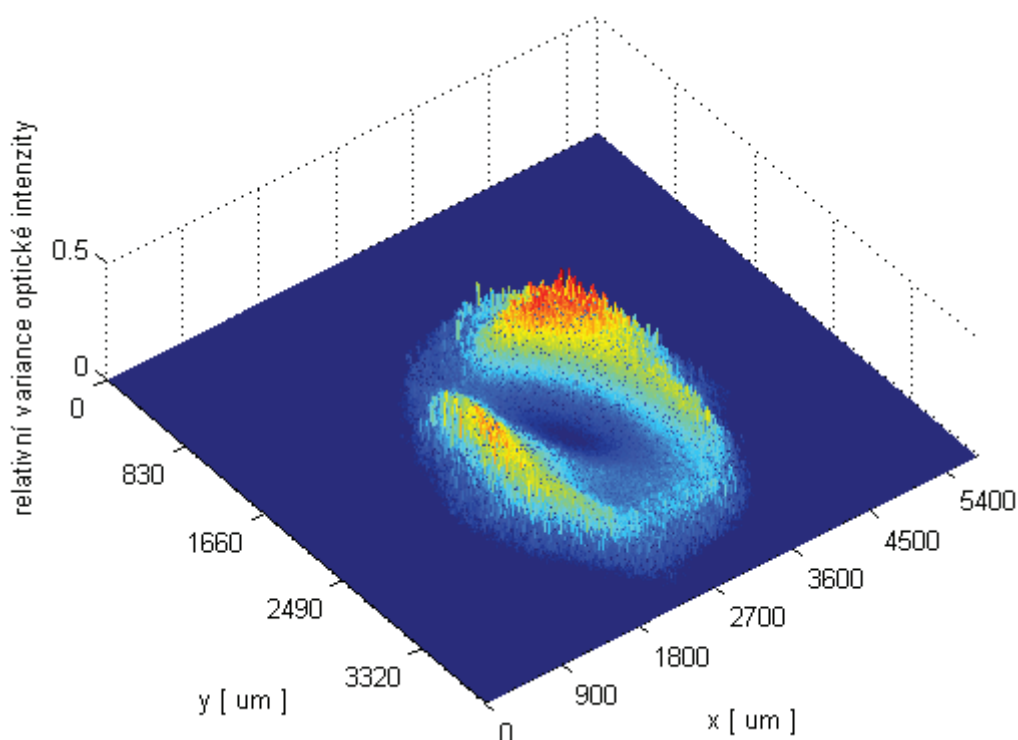
Graf.č.17: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu prostředím bez turbulencí pro laser He-Ne 632,8nm



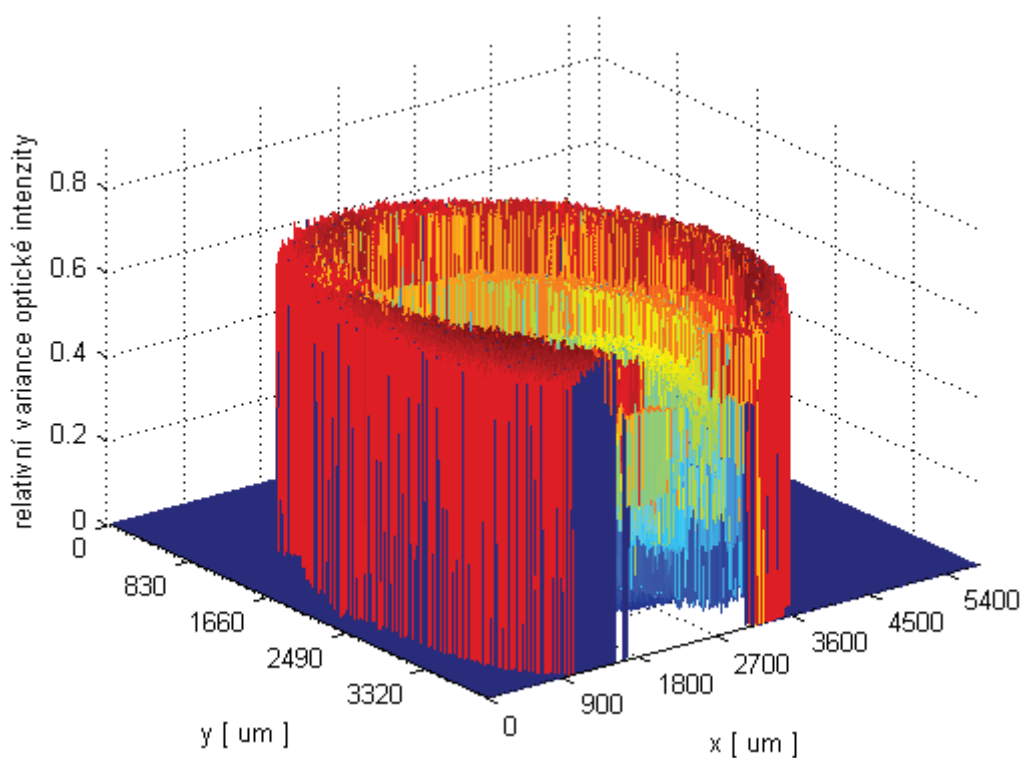
Graf.č.18: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu prostředím bez turbulencí pro laser He-Ne 543nm



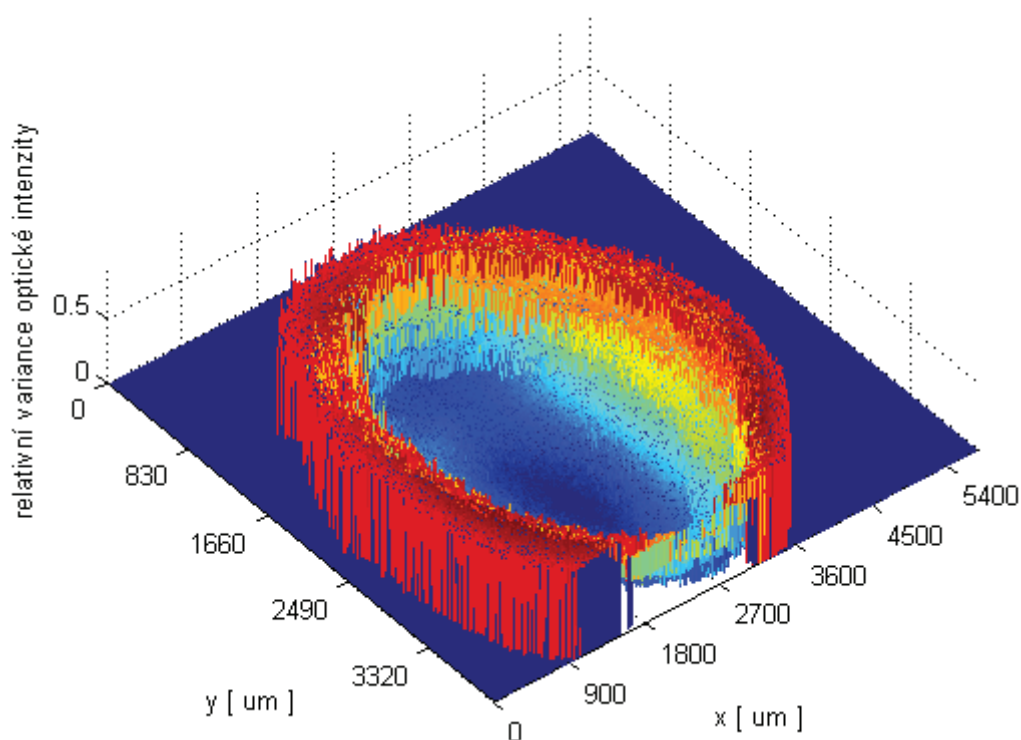
Graf.č.19: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu turbulentním prostředím T 3 pro laser He-Ne 543nm



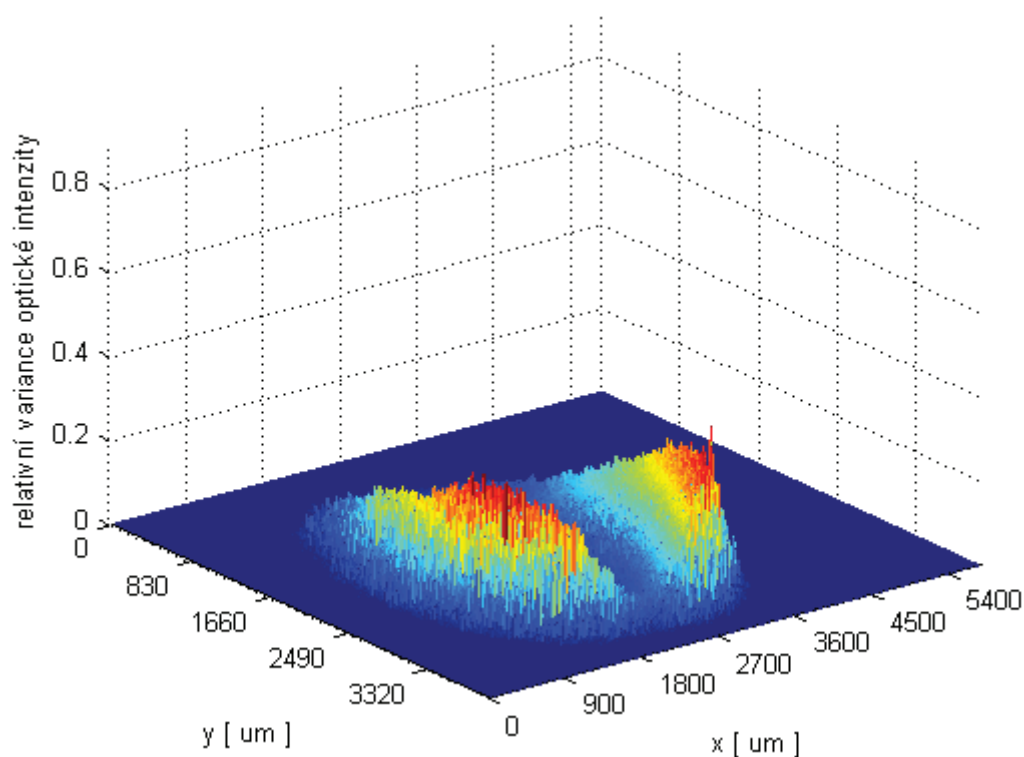
Graf.č.20: Rozložení relativní variance optické intenzity po průchodu turbulentním prostředím T 3 pro laser He-Ne 543nm (Stejný graf jako 19 ale jiný úhel pohledu)



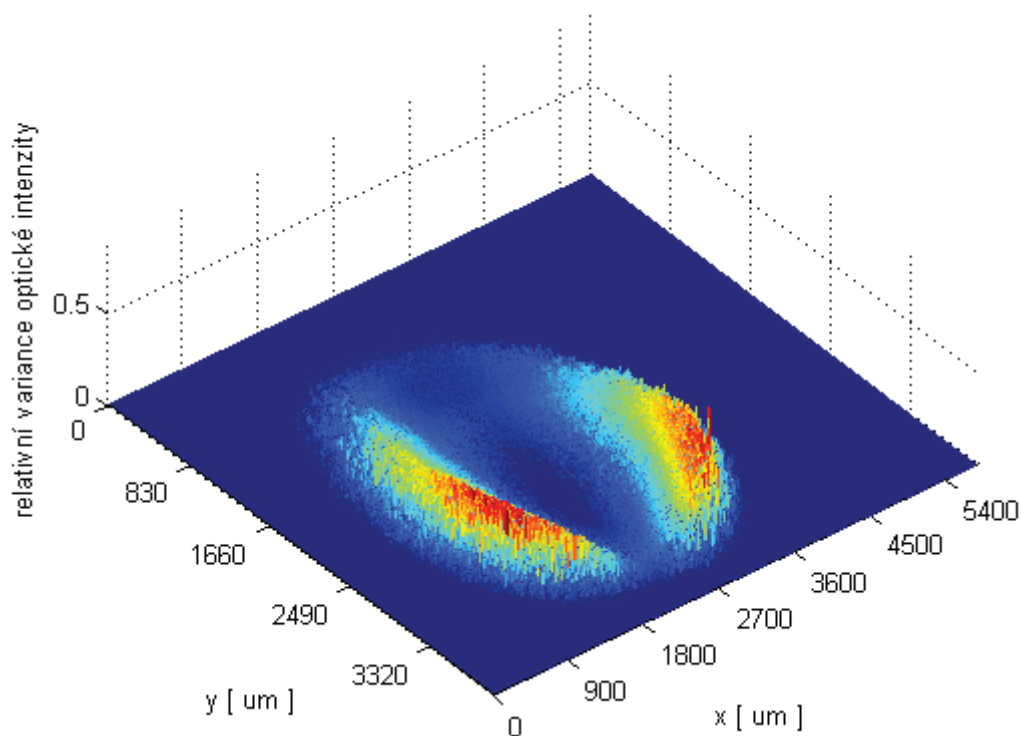
Graf.č.21: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu turbulentním prostředím T 6 pro laser He-Ne 543nm



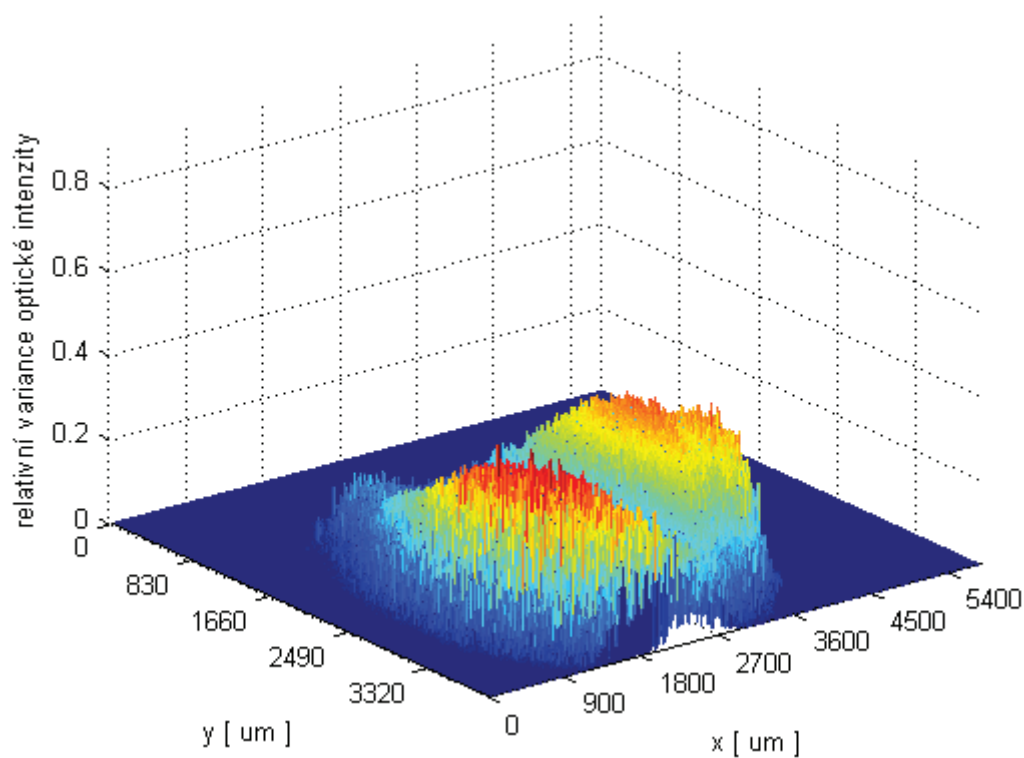
Graf.č.22: Rozložení relativní variance optické intenzity po průchodu turbulentním prostředím T 3 pro laser He-Ne 543nm (Stejný graf jako 21 ale jiný úhel pohledu)



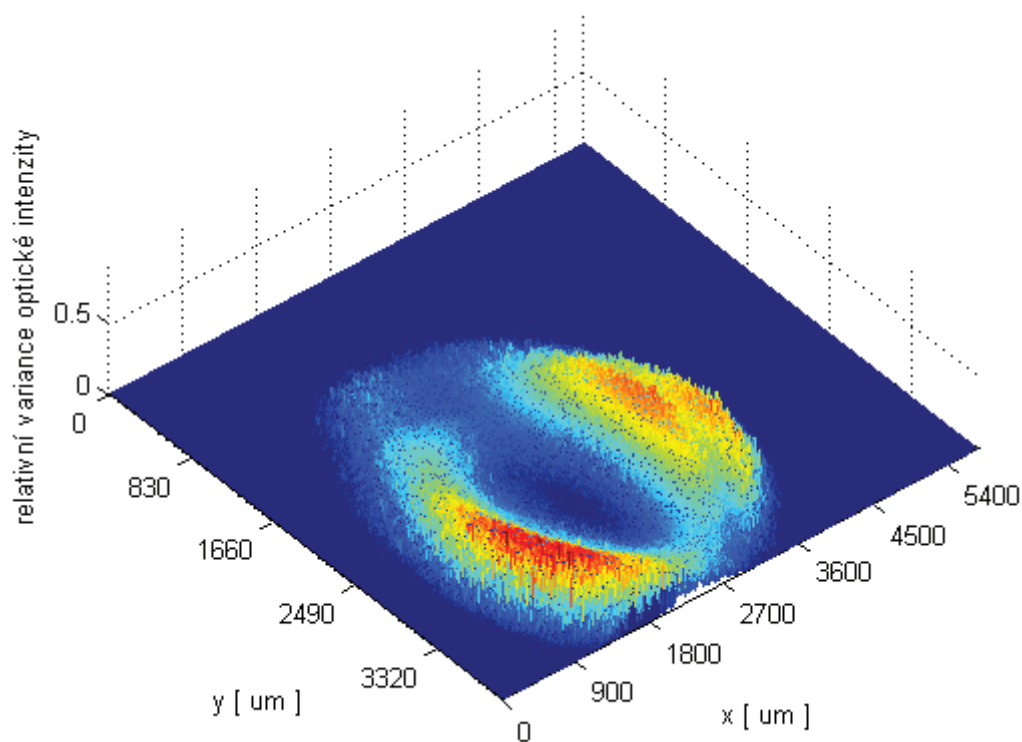
Graf.č.23: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu turbulentním prostředím T 3 pro laser He-Ne 632,8nm



Graf.č.24: Rozložení relativní variance optické intenzity po průchodu turbulentním prostředím T 3 pro laser He-Ne 632,8nm (Stejný graf jako 23 ale jiný úhel pohledu)

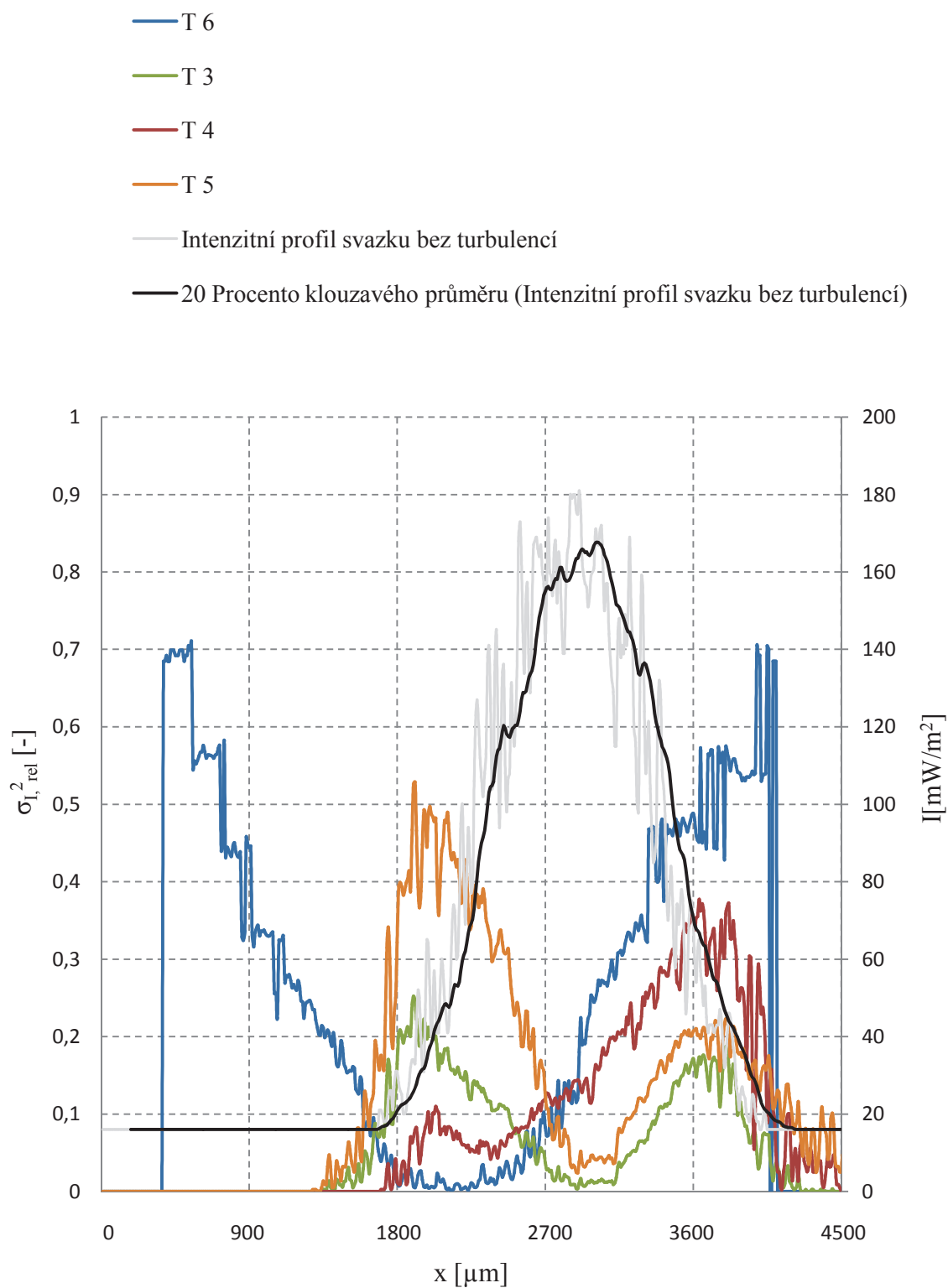


Graf.č.25: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu turbulentním prostředím T 6 pro laser He-Ne 632,8nm

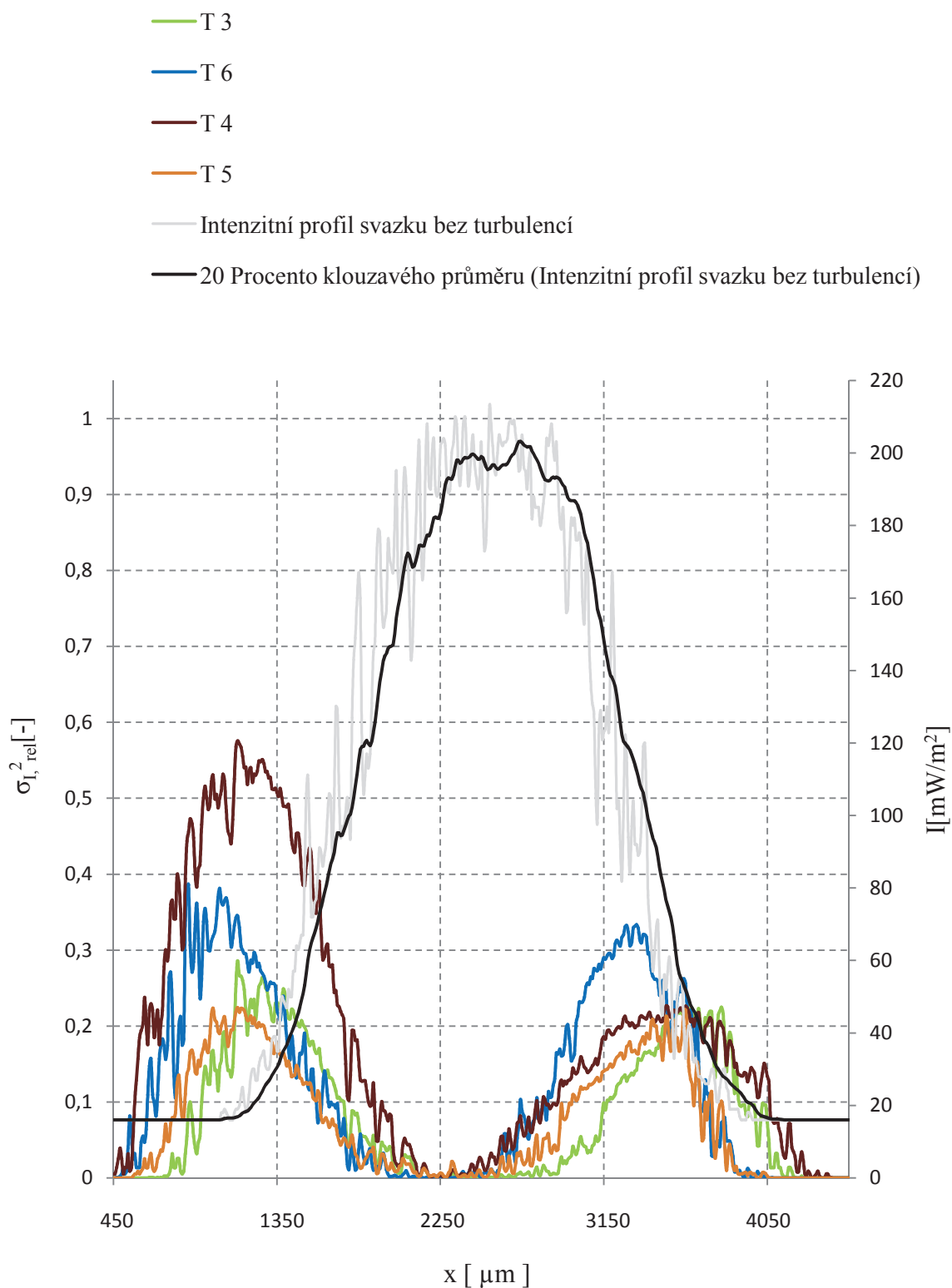


Graf.č.26: Rozložení relativní variance optické intenzity po průchodu turbulentním prostředím T 6 pro laser He-Ne 632,8nm (Stejný graf jako 25 ale jiný úhel pohledu)

Z předcházejících grafů 17-26 je patrný nárůst relativní variance optické intenzity s rostoucím turbulentním stupněm. Z následujícího grafu č.27 (pro laser 543nm) lze porovnat změnu relativní variance optické intenzity ve 2D. Zatímco při turbulentním prostředí T 3 dosahovala variance změn hodnoty okolo 0,2 při turbulentním prostředí T 6 to bylo až 0,7.



Graf.č.27: Rozložení relativní variance optické intenzity po průchodu laserového svazku turbulentním prostředím o různé míře pro laser 543nm



Graf.č.28: Rozložení relativní variance optické intenzity po průchodu laserového svazku turbulentním prostředím o různé míře pro laser 632,8nm

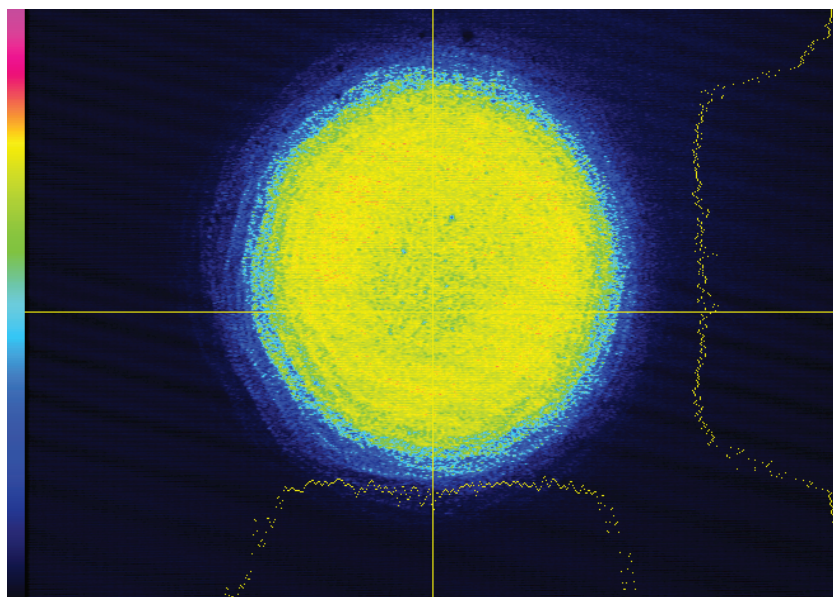
Porovnáme-li grafy 27 a 28, vidíme, že větších maximálních hodnot relativních variancí je dosaženo u laseru 543nm. Zatímco při turbulentním stupni T 6 bylo u laseru 543nm dosaženo relativní variance optické intenzity 0,7 , při stejném turbulentním stupni to bylo u laseru 632,8nm 0,32. Obdobně tomu tak bylo při jiných turbulentních stupních. Relativní variance optické intenzity je tedy menší u laseru 632,8nm.

11.3.2 Závěr

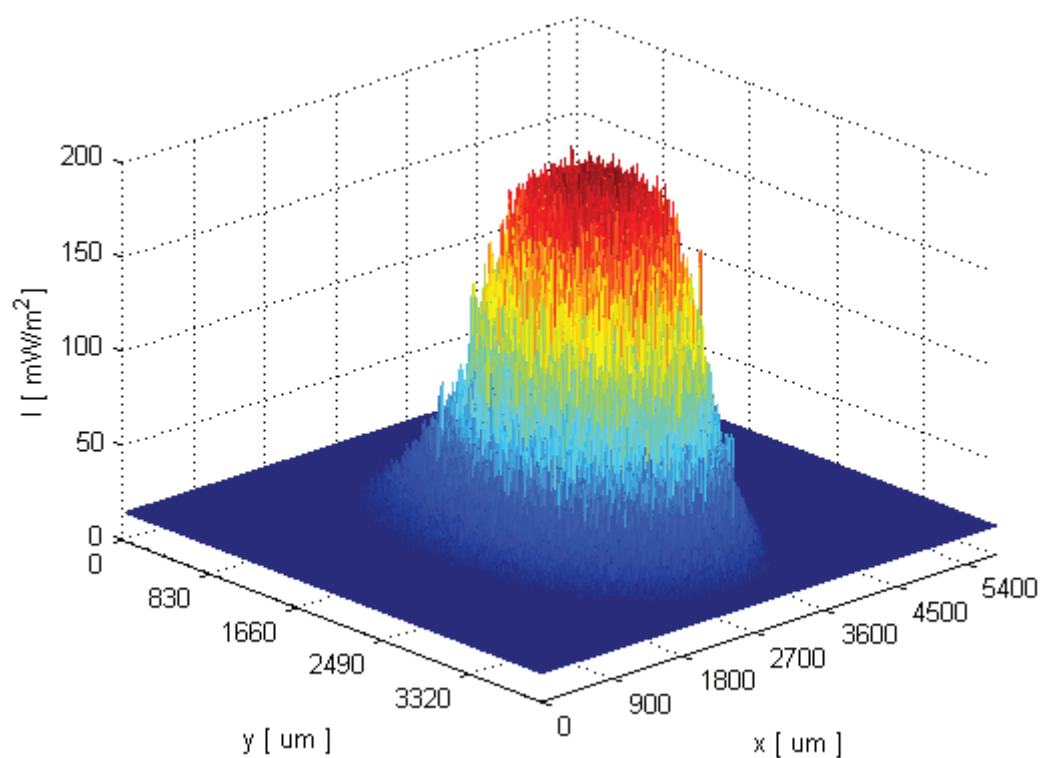
V této kapitole jsem se zabýval porovnáváním dvou laserů o různé vlnové délce. Nejdříve jsem porovnával jejich odolnost při průchodu turbulentním prostředím o různé míře. Laser s vyšší vlnovou délkou podstatně lépe odolával vlivu turbulentního prostředí. Následně jsem z naměřených vzorků vypočítal jejich relativní variance optické intenzity. Tyto výsledky jsem zobrazil v mnoha grafech 3D a 2D, kde je možné pozorovat rozložení relativní variance optické intenzity v profilu svazku. Relativní variance optické intenzity je vždy rozložena v okolí okrajové části svazku a s rostoucí mírou turbulencí proniká i ke středu svazku. Laser s nižší vlnovou délkou opět vykazoval horší hodnoty. Závěrem je tedy fakt, že laser s vyšší vlnovou délkou je odolnější turbulentnímu prostředí a tím i dosahuje menších hodnot relativní variance optické intenzity.

11.4.1 Lasery He-Ne o vlnové délce 632,8nm a 543nm transformované na profil Top Hat

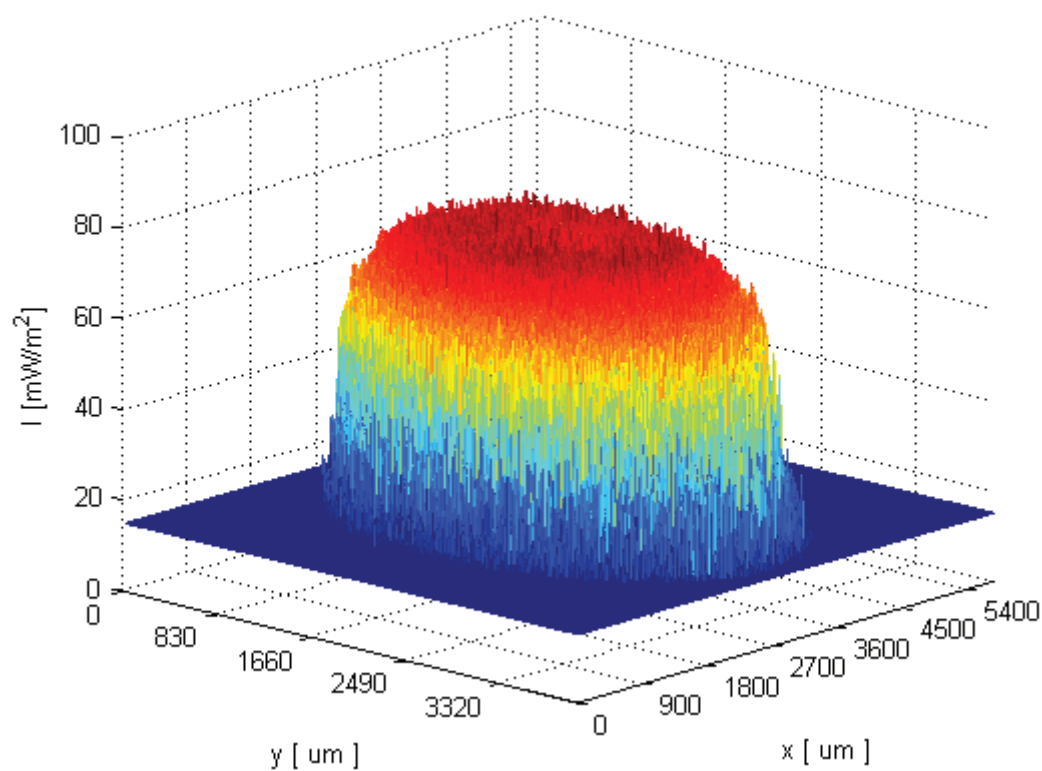
Z předešlé kapitoly je patrné, že turbulentní prostředí velmi výrazně ovlivňuje profil svazku obou měřených laserů, což způsobuje velké hodnoty měřené relativní variance optické intenzity. Z tohoto důvodu jsem upravil profil původního svazku na profil Top Hat. K vytvoření takového profilu jsem použil Top Hat diffuser jak je vysvětleno v kapitole č.6. Na Obr.č.16 je vidět horizontální a vertikální profil Top Hat svazku. Na grafu č.29 je vykreslen reálný kruhově symetrický Gausův svazek a na grafu č.30 je pak z něj vytvořený kruhově symetrický Top Hat svazek.



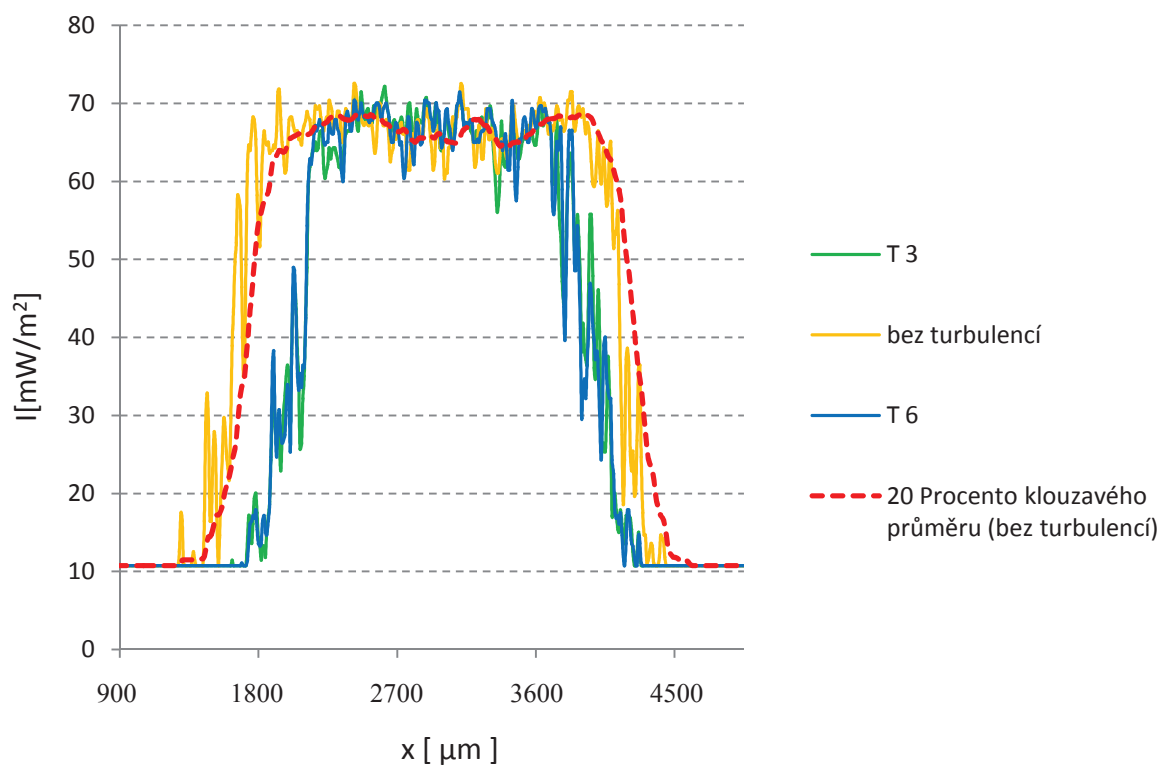
Obr.č.16: Obrázek zobrazený pomocí profilometru pro laser He-Ne 543nm zobrazující laserový svazek po transformaci na Top Hat a jeho horizontální a vertikální profil. Tento obrázek byl zachycen po průchodu svazku prostředím bez turbulencí



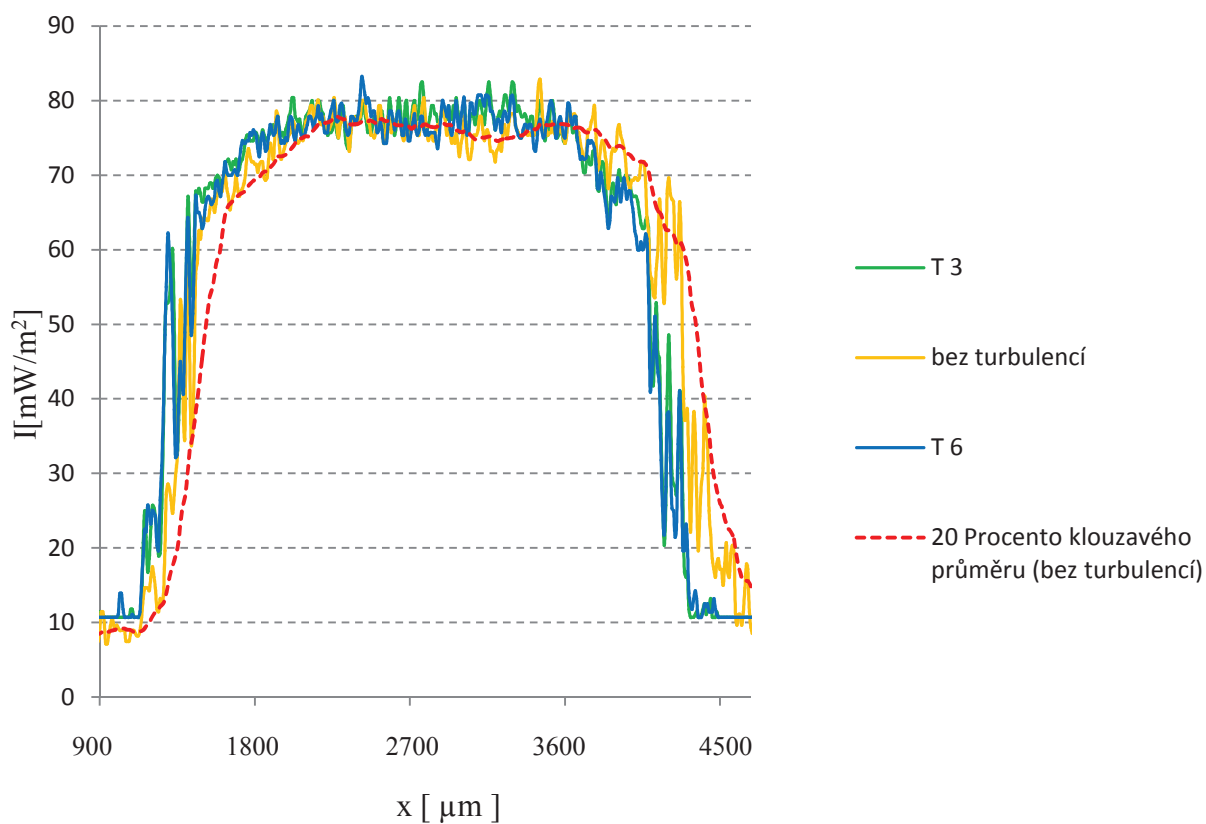
Graf.č.29:Profil svazku He-Ne 632,8nm PŘED transformací na Top Hat profil



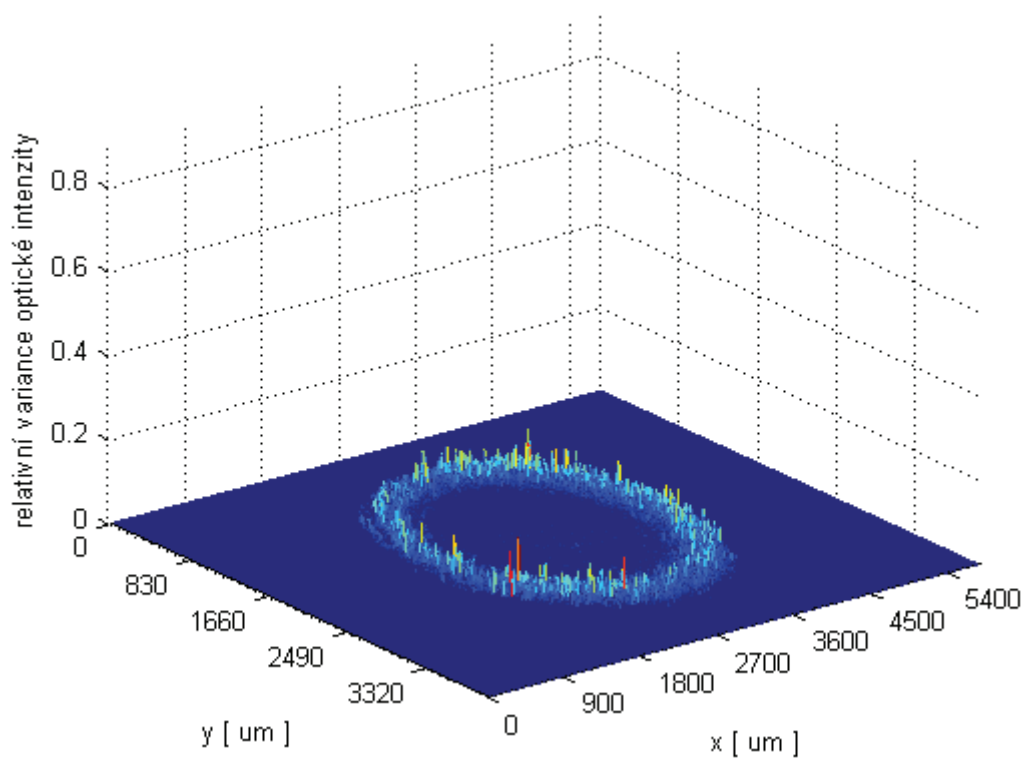
Graf.č.30:Profil svazku He-Ne 632,8nm PO transformací na Top Hat profil



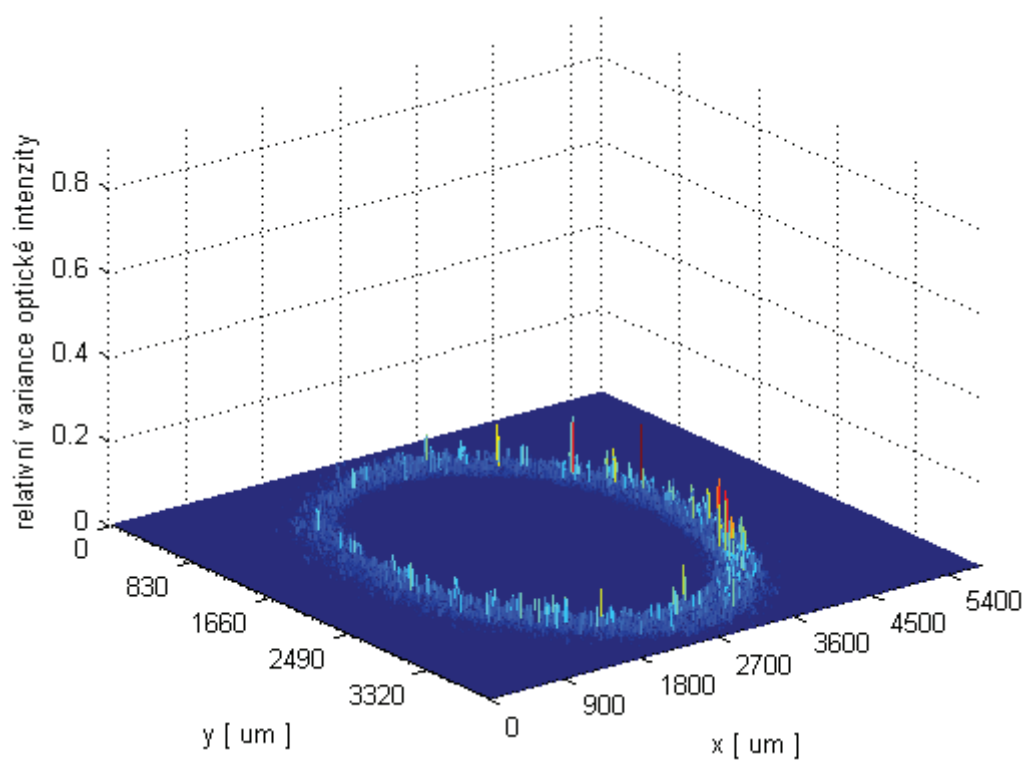
Graf.č.31: Změna profilu laserového svazku He-Ne 543nm (transformovaného na Top Hat profil) po průchodu prostředím s různou mírou turbulencí



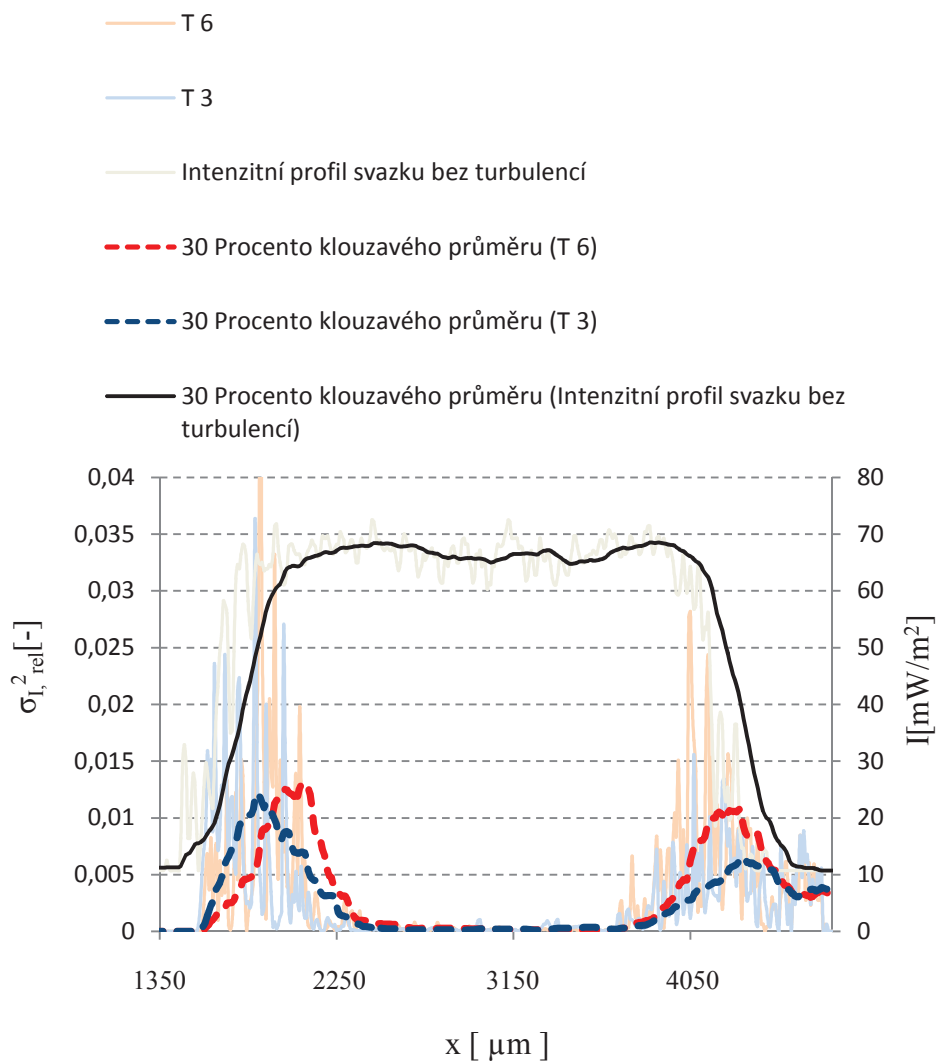
Graf.č.32: Změna profilu laserového svazku He-Ne 632,8nm (transformovaného na Top Hat profil) po průchodu prostředím s různou mírou turbulencí



Graf.č.33: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu turbulentním prostředím T 6 pro laser He-Ne 543nm a profilu Top Hat

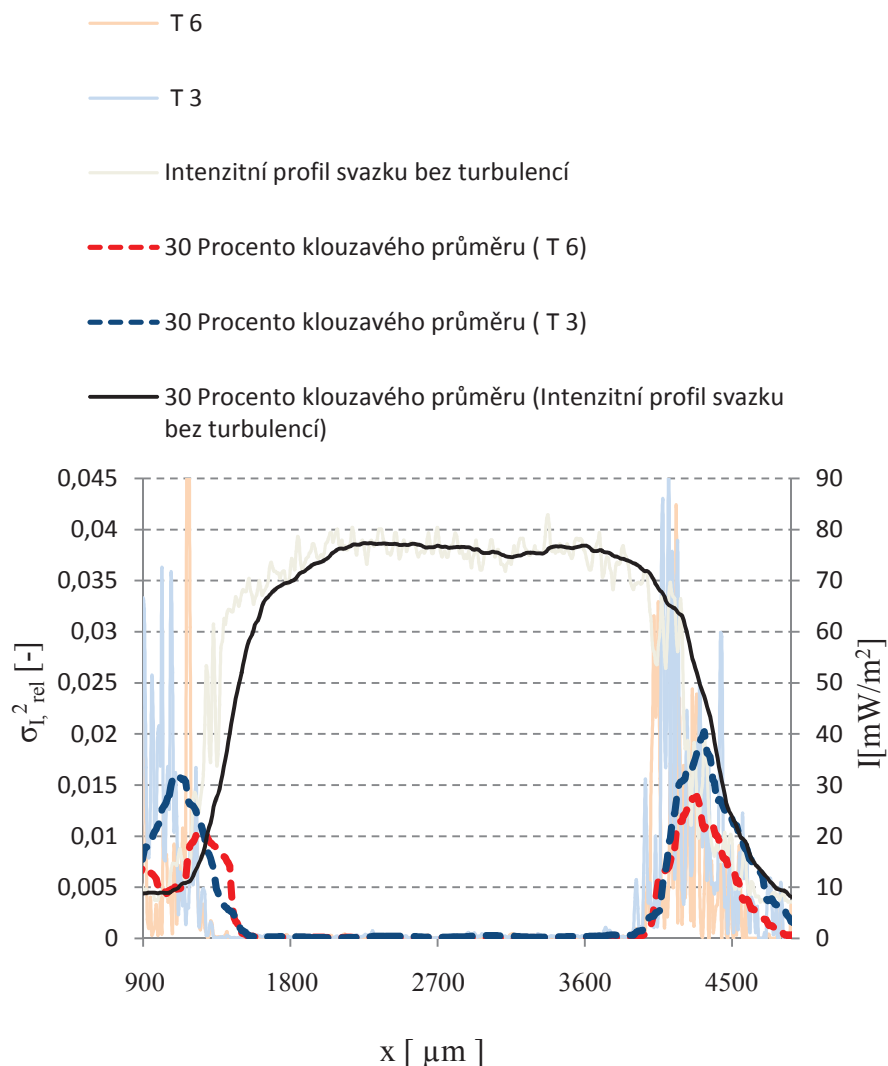


Graf.č.34: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu turbulentním prostředím T 6 pro laser He-Ne 632,8nm a profilu Top Hat



Graf.č.35: Rozložení relativní variance optické intenzity po průchodu laserového svazku (profil Top Hat) turbulentním prostředím o různé míře pro laser 543nm

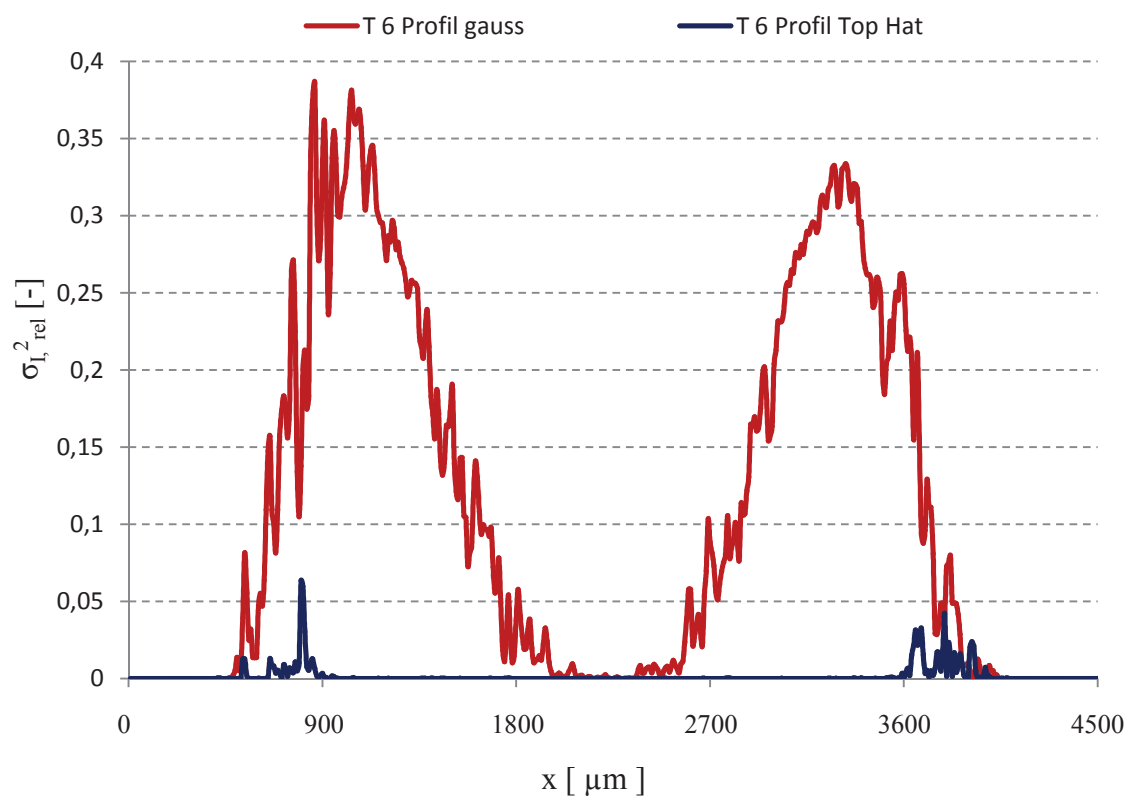
Na grafu č.35 je patrné rozložení relativní variance optické intenzity v profilu Top Hat svazku laseru 543nm. Na následujícím grafu je to samé pro laser 632,8nm. Je vidět jak se zmenšila relativní variance optické intenzity po transformaci svazku na Top Hat.



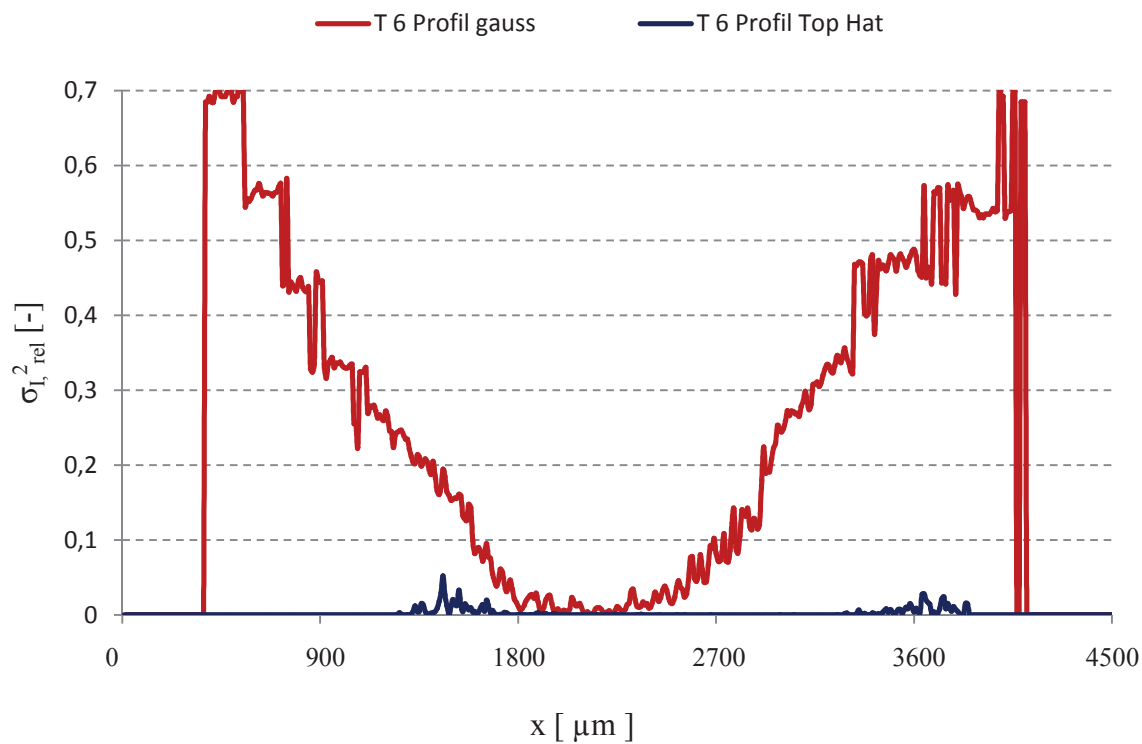
Graf.č.36: Rozložení relativní variance optické intenzity po průchodu laserového svazku (profil Top Hat) turbulentním prostředím o různé míře pro laser 632,8nm

Graf.č.36 zobrazuje rozložení relativní variance optické intenzity pro laser 632,8nm. Opět je patrný výrazný pokles vypočítaných hodnot relativních variancí optické intenzity pro profil Top Hat oproti kruhově orientovanému Gaussovu profilu laserového svazku z předešlé kapitoly.

Na následujících dvou grafech jsem pro porovnání vykreslil výsledné hodnoty vypočítaných relativních variancí optické intenzity pro turbulentní prostředí T 6 obou laserů a jejich dvou měřených profilů svazků. Vliv úpravy profilu svazku na výsledné hodnoty relativních variancí optické intenzity jsou značné. Podle vzorce [4.1] jsem vypočítal strukturní parametr indexu lomu představující míru turbulencí. Pro výpočet jsem použil známé hodnoty, za relativní varianci optické intenzity maximální hodnoty z příslušných grafů. Pro laser 632,8nm, profil svazku Top Hat, turbulentní prostředí T 6 vyšel $C_n^2=8,7 \cdot 10^{-13}$ a pro Gaussov profil $C_n^2=5 \cdot 10^{-10}$. Pro laser 543nm, profil svazku Top Hat, turbulentní prostředí T 6 vyšel $C_n^2=1 \cdot 10^{-14}$ a pro Gaussov profil $C_n^2=2 \cdot 10^{-10}$. U obou laserů vykazuje Top hat profil menší hodnotu strukturního parametru.



Graf.č.37: Porovnání relativní variance optické intenzity pro turbulentní prostředí T 6 laseru 632,8nm profilů svazků Top Hat a Gauss



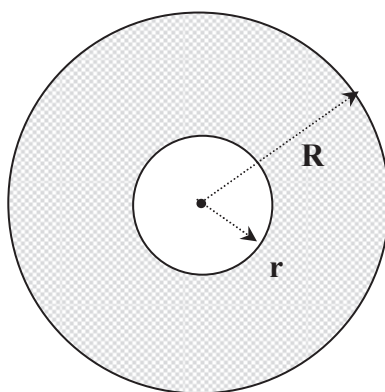
Graf.č.38: Porovnání relativní variance optické intenzity pro turbulentní prostředí T 6 laseru 543nm profilů svazků Top Hat a Gauss

11.4.2 Závěr

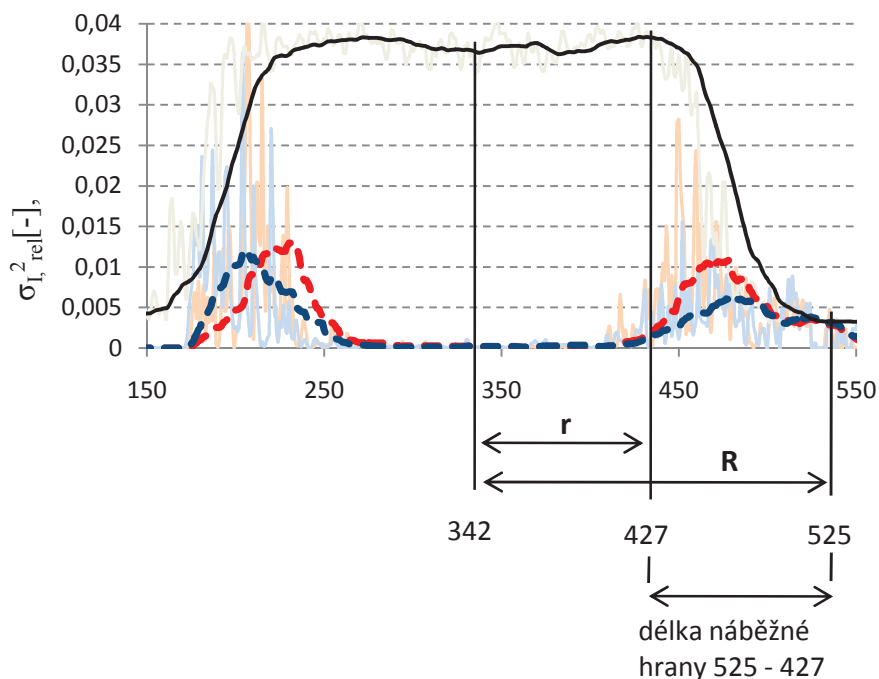
Z původního kruhově orientovaného Gaussova svazku se mi podařilo vytvořit kruhově orientovaný Top Hat svazek. Pro takový svazek jsem provedl stejná měření jako v kapitole 11.3.1. Výsledky je možné vzájemně porovnávat, neboť pro měření bylo použito stejných pracovních podmínek. Změna profilu na Top Hat způsobila, že laser 543nm byl mnohonásobně odolnější turbulentním vlivům. Zlepšení nastalo i u laseru 632,8nm. Z naměřených hodnot jsem rovněž vypočítal relativní variance optické intenzity. U kruhově orientovaného Gaussova svazku (laser 543nm) jsem při turbulentním prostředí T 3 vypočítal maximální hodnotu relativní variance optické intenzity 0,2 po převodu na Top Hat byla relativní variance optické intenzity pro stejné turbulentní prostředí T 3 0,012(při posouzení z klouzavého průměru). U laseru 632,8nm to bylo rovněž velmi výrazné zlepšení což je patrné zhlédnutím grafů. Srovnání dosažených výsledků je v grafech č.37 a č.38.

11.5.1 Stanovení rozložení relativní variance optické intenzity v profilu svazku

Z předcházejících grafických závislostí rozložení relativní variance optické intenzity v profilu svazku je patrné, že se relativní variance optické intenzity rozkládá v okrajových částech svazku. Rozložení je kruhově symetrické kolem osy svazku. Z těchto důvodů stanovují rozložení relativní variance optické intenzity jako plochu mezikružzí, kde poloměr menší kružnice je dán vzdáleností středu svazku a místem, kde začíná horní část náběžné hrany svazku. Poloměr větší kružnice pak je vzdálenost středu svazku a začátkem náběžné hrany svazku. Vše je patrné z obr č.17 a č.18. Jelikož se jedná o grafickou metodu určování rozložení relativní variance optické intenzity, kde hodnoty k výpočtům zjišťují odečítáním hodnot z grafů, může dojít k určité chybě. K dané chybě se přičte i chyba reálného svazku, neboť měřený svazek není ideální. Výpočty provádím z matice 640x480bodů odpovídající změřeným hodnotám pomocí profilometru.



Obr.č.17: Mezikružzí pro stanovení rozložení relativní variance optické intenzity



Obr.č.18: Stanovení rozložení relativní variance optické intenzity

Plocha mezikruží se obecně vypočítá jako rovnice:

$$S = \pi (R^2 - r^2)$$

pak plocha rozložení relativní variance optické intenzity se vypočítá stejně, jen zavedu indexaci parametrů:

$$S_{\delta_{I,rel}^2} = \pi(R_{Hmin}^2 - r_{Hmax}^2)[bod]$$

Příklad 1:

Stanovení rozložení relativní variance optické intenzity pro laser 543nm profil Top Hat. Potřebné hodnoty jsou odečteny z grafu x.

$$S_{\delta_{I,rel}^2} = \pi(R_{Hmin}^2 - r_{Hmax}^2) = \pi(183^2 - 85^2) = 82\,510 \text{ bodů}$$

Ověření výsledků pomocí programu Matlab pomocí příkazu:

S=length(find(matice vypočítaných hodnot relativní variance optické intenzity))

⇒ tento řádek nám stanoví součet všech nenulových hodnot matice

S_{T6} = 80 540 bodů

S_{T3} = 80 213 bodů

Příklad 2:

Stanovení rozložení relativní variance optické intenzity pro laser 632,8nm Profil Top Hat. Potřebné hodnoty jsou odečteny z grafu x.

$$S_{\delta_{I,rel}^2} = \pi(R_{Hmin}^2 - r_{Hmax}^2) = \pi(234^2 - 110^2) = 134\,007 \text{ bodů}$$

Ověření výsledků pomocí programu Matlab pomocí příkazu:

S=length(find(matice vypočítaných hodnot relativní variance optické intenzity))

⇒ tento řádek nám stanoví součet všech nenulových hodnot matice

S_{T6} = 135 584 bodů

S_{T3} = 141 892 bodů

Příklad 3:

Stanovení rozložení relativní variance optické intenzity pro laser 632,8nm, kruhově orientovaný Gaussův profil svazku. Potřebné hodnoty jsou odečteny z grafu x.

$$S_{\delta_{I,rel}^2} = \pi(R_{Hmin}^2 - r_{Hmax}^2) = \pi(175^2 - 15^2) = 95\,504 \text{ bodů}$$

Ověření výsledků pomocí programu Matlab pomocí příkazu:

S=length(find(matice vypočítaných hodnot relativní variance optické intenzity))

⇒ tento řádek nám stanoví součet všech nenulových hodnot matice

S_{T1} = 93 176 bodů

S_{T2} = 102 656 bodů

S_{T3} = 104 796 bodů

Pro další změřené turbulentní stupně daná metoda neplatí. Dochází k podstatnému zvětšení plochy (cca o 1/3 plochy než je určeno pomocí grafické metody z profilu svazku bez turbulentí). To je způsobeno změnou profilu svazku vlivem extrémně silných turbulentí.

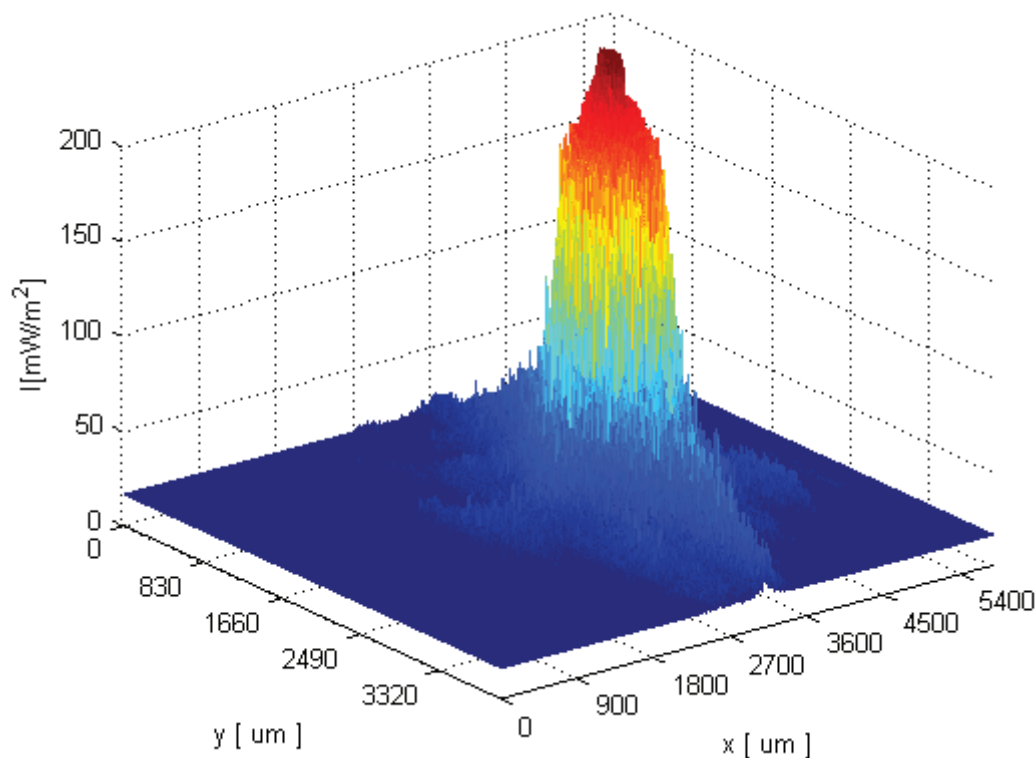
Maximální výška mezikruží (pokud bychom chtěli vykreslit 3 D profil rozložení relativní variance optické intenzity) je rovna vypočítaným maximálním hodnotám relativní variance optické intenzity. Maximální výška mezikruží pro jednotlivé turbulentní stupně závisí na mnoha faktorech jako je délka spoje, strukturní parametr indexu lomu, velikost přijímací soustavy a vlnová délka daného laseru.

10.5.2 Závěr

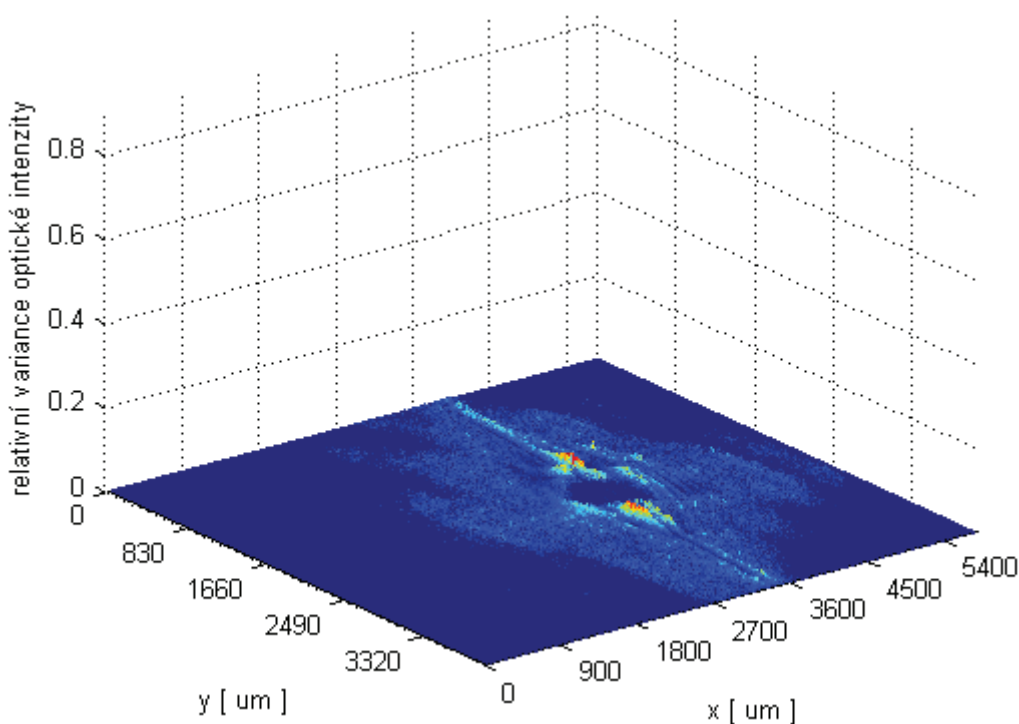
V této kapitole jsem sestrojil grafickou metodu pro určení rozložení relativní variance optické intenzity. Dané hodnoty jsem kontroloval pomocí programu Matlab z již vypočítaných matic relativní variance optické intenzity. Daná graficko-početní metoda, jak je vidět z příkladů výpočtu, velmi blízce odpovídá skutečnosti u profilu svazku Top Hat obou laseru, pro všechny míry turbulencí. U laseru 632,8nm s kruhově orientovaným Gaussovým profilem svazku daná metoda platí do turbulentního stupně T 3. Pro vyšší míru turbulencí neplatí, neboť dochází u daného profilu svazku k jeho degradaci, což způsobuje nárůst relativní variance optické intenzity jak do velikosti tak i do plochy kterou pokrývá v profilu svazku. Pro laser 543nm jsem tuto metodu neuplatňoval, neboť z grafů v této práci je patrné, že pokud se nepřevede na profil Top Hat, je zcela nevhodný pro použití v turbulentní atmosféře.

11.6. Laserové diody 405nm a 635nm

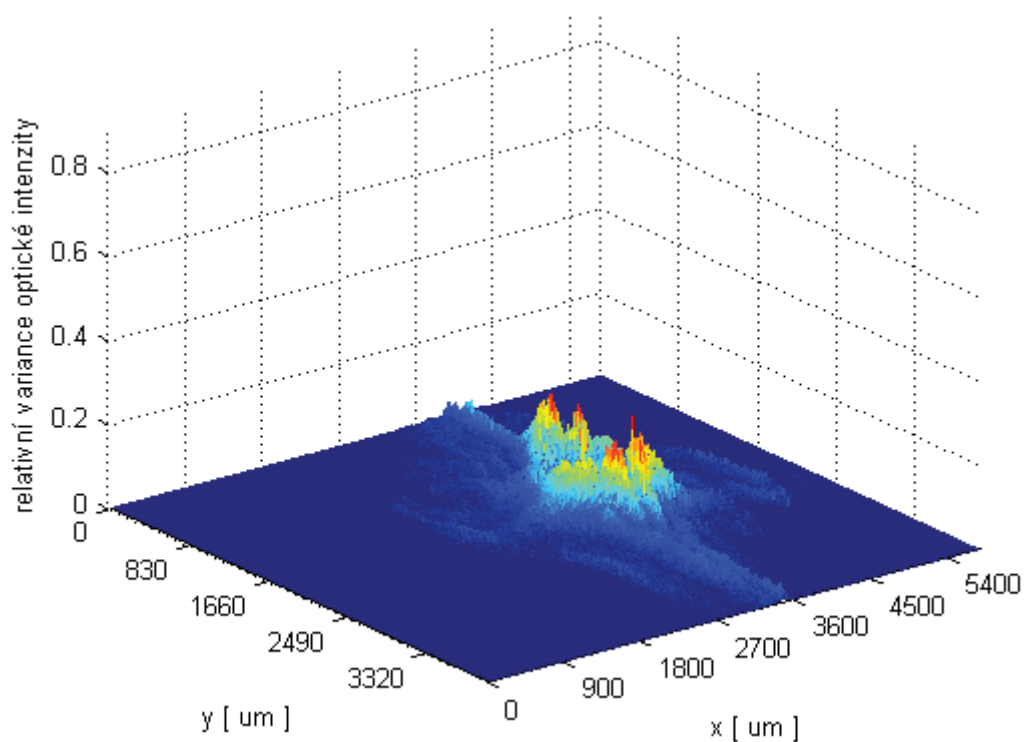
V poslední části diplomové práce jsem proměřil vliv turbulentního prostředí na laserové diody a z naměřených hodnot jsem vypočítal relativní variance optické intenzity. V následujících grafech jsou prezentovány vypočítané hodnoty relativní variance optické intenzity pro různé míry turbulentního prostředí.



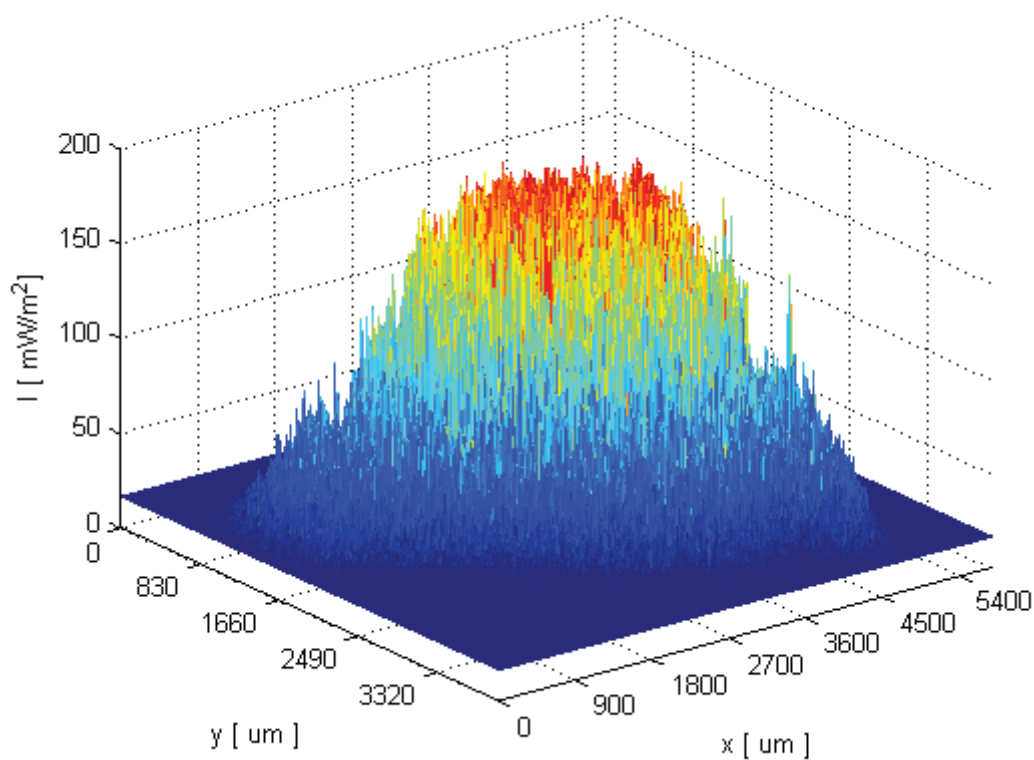
Graf.č.37: Profil svazku laserové diody 405nm



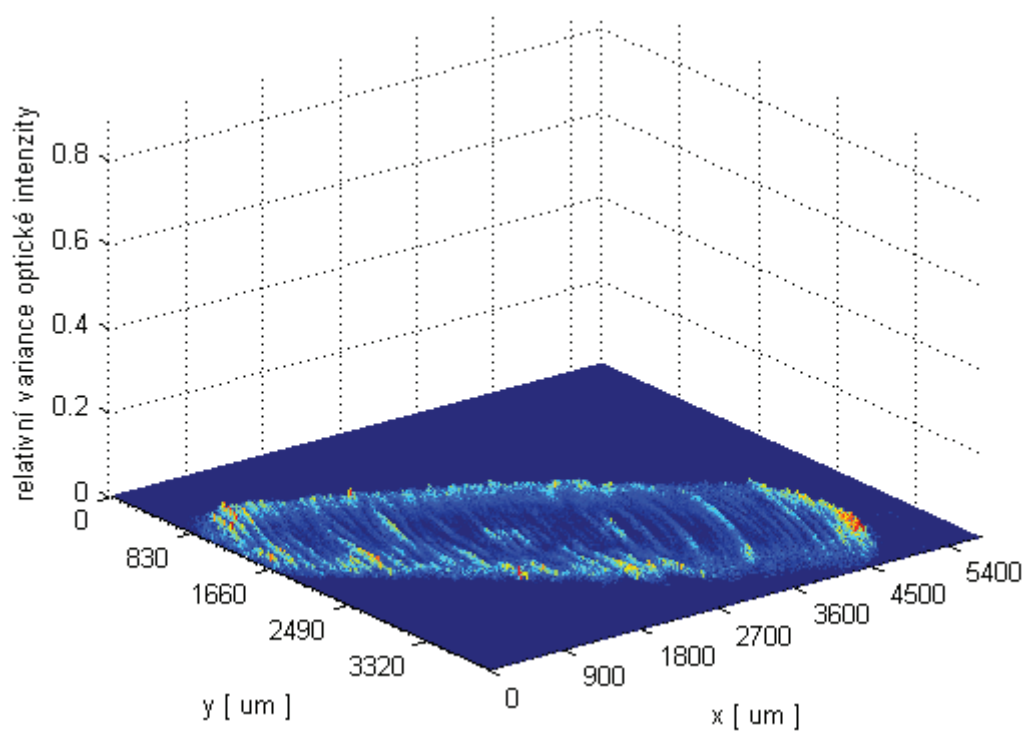
Graf.č.38: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu turbulentním prostředím T 3 pro laserovou diodu 405nm



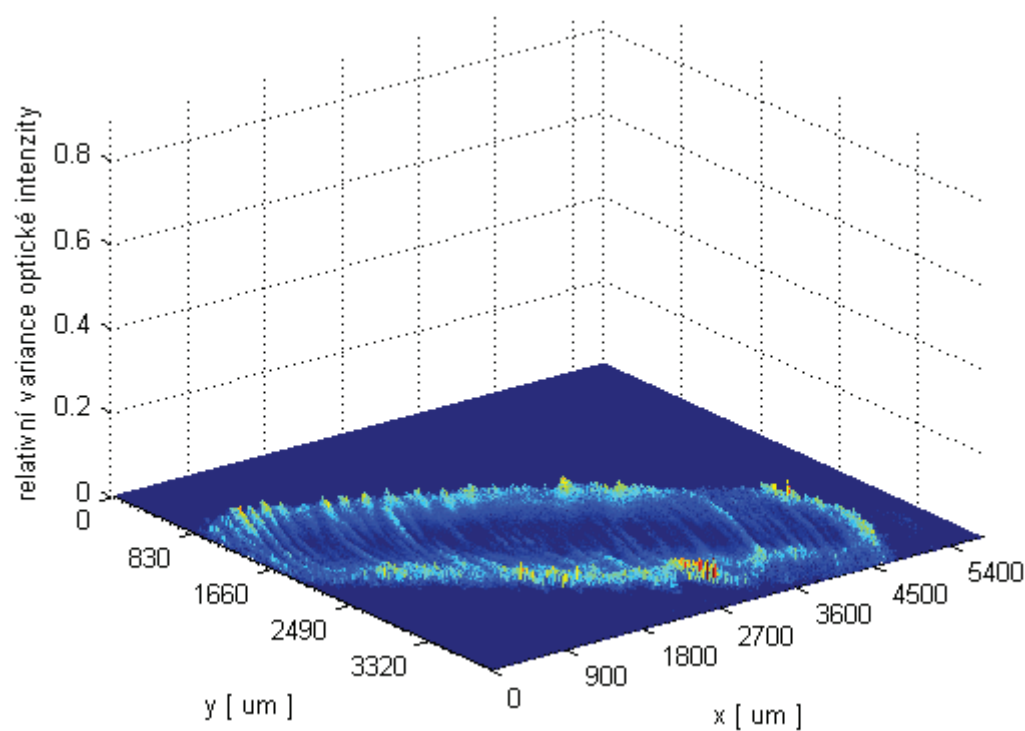
Graf.č.39: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu turbulentním prostředím T 6 pro laserovou diodu 405nm



Graf.č.40: Profil svazku laserové diody 635nm



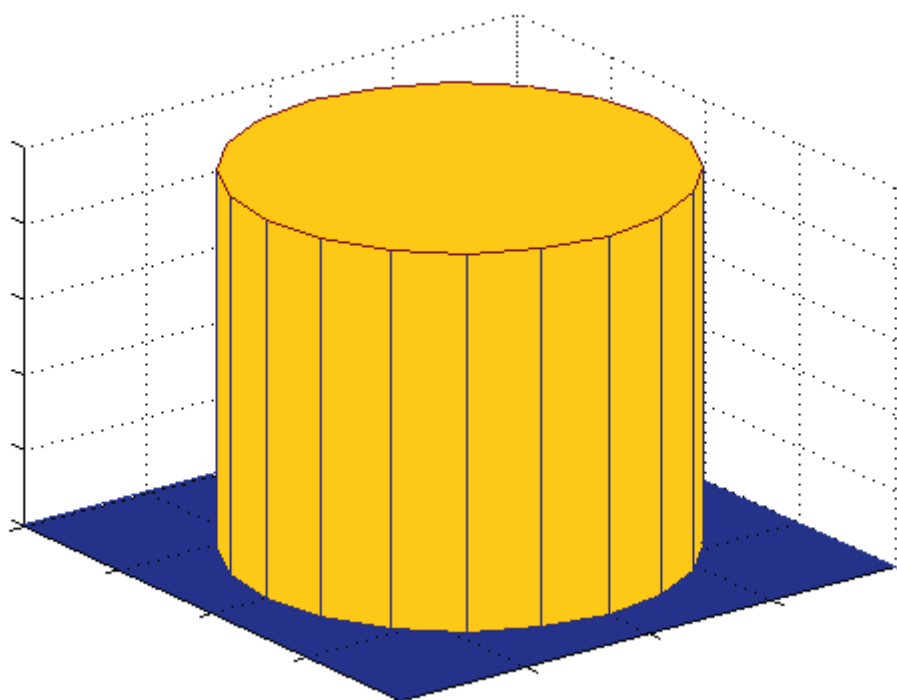
Graf.č.41: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu turbulentním prostředím T 3 pro laserovou diodu 635nm



Graf.č.42: Relativní variance optické intenzity vypočítaná z hodnot naměřených vzorků po průchodu turbulentním prostředím T 6 pro laserovou diodu 635nm

11.7 Stanovení optimálního tvaru laserového svazku pro turbulentní atmosféru

Z naměřených a vypočítaných výsledků této práce je patrné, že se relativní variance optické intenzity vyskytuje v místě náběžné hrany svazku. Relativní variance optické intenzity vycházela pro oba měřené lasery podstatně lépe u kruhově orientovaného Top Hat profilu. V kapitole 11.5.1 je stanovena metoda pro určení rozložení relativní variance optické intenzity v profilu svazku pomocí náběžné hrany laserového svazku. Z toho vyplývá, že čím je kratší náběžná hrana svazku, tím je i menší plocha rozložení relativní variance optické intenzity v profilu svazku. V ideálním případě tedy nulová náběžná hrana Top Hat svazku. Z naměřených výsledků tedy usuzují, že nejlepší tvar svazku do turbulentní atmosféry je ideální kruhově orientovaný Top Hat.



Obr.č.19: Ideální profil svazku do turbulentní atmosféry ,tzn. ideální kruhově orientovaný Top Hat svazek

12. Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo sestavit experimentální pracoviště pro měření vlivu turbulencí na intenzitní profil laserového svazku a pro různé míry turbulencí proměřit vlastnosti laserového svazku. Z naměřených hodnot pak vypočítat relativní varianci optické intenzity a z vypočítaných hodnot pak stanovit, jaké je rozložení relativní variance optické intenzity v laserovém svazku. Nakonec ze zjištěných parametrů navrhnout optimální tvar laserového svazku pro turbulentní atmosféru.

Práci bych rozdělil na dvě odlišné části, část teoretickou a část praktickou. V teoretické části jsem nejdříve popsal druhy atmosférických turbulencí, jejich vliv na laserový svazek. Dále pak následuje popis relativní variance optické intenzity. V další části je popsán Gaussův svazek, některé jeho parametry a možný převod laserového svazku z kruhově orientovaného Gaussova profilu, na kruhově orientovaný profil Top Hat pomocí Top Hat diffuseru, tuto metodiku jsem pak používal pro tvarování svazku v laboratoři. Teoretická část dále obsahuje modely pro stanovení útlumu na přenosové trase optické linky způsobeného mlhou, sněžením a turbulencemi. V desáté kapitole jsem popsal metodiku měření, kterou jsem používal v laboratoři a jsou zde i popsány jednotlivá pracoviště. Nejvíce pokusů a měření jsem prováděl s pomocí profilometru.

Praktická část je rozdělena na tři části a to na měření využívající spektrometr, měřák výkonu a profilometr. Za nejdůležitější považuji měření rozložení relativní variance optické intenzity pomocí profilometru pro dva typy laserů He-Ne 632,8nm a 543nm. Z naměřených profilů svazku po průchodu turbulentním prostředím jsem počítal relativní varianci optické intenzity pomocí programu Matlab. Vypočítané hodnoty jsem vykreslil do mnoha grafů 2D a 3D. Za nejdůležitější grafy z kapitoly 11.3.1 považuji graf č.27 a č.28. Tyto grafy obsahují srovnání rozložení relativní variance optické intenzity v profilu svazku pro jednotlivá simulovaná turbulentní prostředí T 3 – T 6. Je z nich patrné, že relativní variance optické intenzity dosahovala menších hodnot pro laser 632,8nm.

V kapitole 11.4.1 jsem převedl profil obou laserů na profil Top Hat a provedl stejná měření jako v předešlé kapitole. Z grafů č.33-č.36 je patrné, že výsledná relativní variance optické intenzity je mnohem menší pro profil svazku Top Hat než tomu bylo v případě kruhově orientovaného Gaussova profilu svazku v předešlé kapitole. Grafy č.37 a č.38 (str.53) považuji z celé práce za nejdůležitější, představují porovnání výsledné relativní variance optické intenzity pro turbulentní prostředí T 6 obou laserů a profilů svazků Top Hat a Gauss. Dosazením do vzorce [4.1] jsem vypočítal strukturní parametr indexu lomu představující míru turbulencí. Za relativní varianci optické intenzity jsem dosadil maximální hodnoty z příslušných grafů. Pro laser 632,8nm, profil svazku Top Hat, turbulentní prostředí T 6 vyšel $C_n^2=8,7 \cdot 10^{-13}$ a pro Gaussův profil $C_n^2=5 \cdot 10^{-10}$. Pro laser 543nm, profil svazku Top Hat, turbulentní prostředí T 6 vyšel $C_n^2=1 \cdot 10^{-14}$ a pro Gaussův profil $C_n^2=2 \cdot 10^{-10}$. Je tedy patrné, že profil Top Hat je vhodnější do turbulentní atmosféry, neboť strukturní parametr vyjadřuje míru turbulencí.

V kapitole 11.5.1 jsem stanovil rozložení relativní variance optické intenzity v profilu svazku jako plochu mezikruží a zavedl graficko-početní metodu pro určení rozložení relativní variance optické intenzity v profilu svazku. Tuto metodu jsem srovnával s výsledky z Matlabu. Příklady výpočtů jsou na straně 56. V kapitole 11.6 jsem se zabýval vlivem turbulentního prostředí na laserové diody, výsledky jsou patrné z příslušných grafů. Nakonec jsem z výsledků práce stanovil optimální profil svazku do turbulentní atmosféry a to ideální kruhově orientovaný Top Hat svazek. Je samozřejmé, že vyrobit takový svazek je nemožné, proto je potřeba mít snahu se mu co nejvíce přiblížit.

13. Literatura

- [1] Jiří Vašíček [Online]. Vysvětlení některých meteorologických pojmů a jevů. Dostupné na [www: http://www.chmi.cz/meteo/olm/Let_met/Pojmy_2.htm](http://www.chmi.cz/meteo/olm/Let_met/Pojmy_2.htm)
- [2] Otakar Wilfert. Fotonika a optické komunikace, Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně
- [3] ANDREWS, L. C., PHILLIPS, R. L. Laser Beam Propagation through Random Media. Bellingham:SPIE, 1998.
- [4] SALEH, B. E. A., TEICH, M. C. Fundamentals of Photonics. New York: John Wiley, 1991.
- [5] ANDREWS, L., PHILLIPS, R., HOPEN, C. Laser Beam Scintillation with Applications. Washington:Spie Press, 2001.
- [6] Zbyněk RAIDÁ, Dušan ČERNOHORSKÝ, Dalimil GALA, Stanislav GOŇA, Zdeněk NOVÁČEK, Viktor OTEVŘEL, Václav MICHÁLEK, Vlastimil NAVRÁTIL, Tomáš URBANEC, Zbyněk ŠKVOR, Petr POMĚNKA, Jiří ŠEBESTA, Geert VANDERSTEGEN, Bart VANDIJCK, Bert SOORS, Jeroen SCHEVERNELS, Javier MARTÍN DEL VALLE, Martin ŠTUMPF, Vladimír ŠEDĚNKA, Peter KOVÁCS, Jaroslav LÁČÍK, Jana JILKOVÁ, Zbyněk LUKEŠ, Michal POKORNÝ. [Online]. Multimediální učebnice Elektromagnetické vlny a Mikrovlnná technika. Dostupné na [www: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php](http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php)
- [7] Al Naboulsi^{1,2} M., Sizun H.¹, de Fornel F.² [Online]. Propagation of optical and infrared waves in the atmosphere. Dostupné na [www.ursi.org/Proceedings/ProcGA05/pdf/F01P.7\(01729\).pdf](http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA05/pdf/F01P.7(01729).pdf)
- [8] Laser components [Online]. Top Hat Beam Shaper. Dostupné na [www: http://www.lasercomponents.com/fileadmin/user_upload/home/Datasheets/holoor/top-hat_beam-shaper.pdf](http://www.lasercomponents.com/fileadmin/user_upload/home/Datasheets/holoor/top-hat_beam-shaper.pdf)
- [9] Otakar Wilfert [Online]. Prezentace optická komunikace 07. Dostupné na [www: http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_pages/projekty/clanky/optic_kom.pdf](http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_pages/projekty/clanky/optic_kom.pdf)
- [10] Josef Blažej [Online]. Diagnostika příčného profilu svazku. Dostupné na [www: http://kfe.fjfi.cvut.cz/~blazej/cz/vyu/12plt/ul4.html](http://kfe.fjfi.cvut.cz/~blazej/cz/vyu/12plt/ul4.html)

14. Použité měřicí přístroje:

1. **Laser HeNe**
model LHP 991
série č: 08004-1
filtr(50%)Hama, č. 75949
max výkon: 1mW
 $\lambda = 632,8 \text{ nm}$
2. **Profilometr**
LBP-4-USB
621B,irvine,CA USA
3. **2x plotýnka ETA**
Typ 2109000
P= 1500W
4. **Laboratorní nastavitelné zrcadlo**
5. **P-metr**
Vega ophir
PD300-3W-V1ROHS
6. **Laboratorní clona**
7. **Spektrometr**
Avantes
Ava spec-3648
8. **PC-48**
9. **Laser He-Ne**
543,5nm
4266AN
10. **LD –HLG 312 G**
635nm
11. **LD- HL6722G**
405nm

15. Seznam použitých symbolů:

C_n^2	Strukturní parametr [$m^{-2/3}$]
h	Výška [m]
w	Rychlost větru [m/s]
A	Nominální hodnota C_n^2 [$m^{-2/3}$]
P	Atmosférický tlak [mbar]
T	Teplota prostředí [$^{\circ}C$]
C_T^2	Teplotně strukturní parametr [$deg^2/m^{2/3}$]
R	Vzdálenost dvou měřících bodů [m]
t	Čas [h]
α_{ad}	Útlum Radiační mlhy [dB]
λ	Vlnová délka [nm]
V	Viditelnost [m]
S	Míra sněžení [mm/h]
α_{snez}	Útlum způsobený sněžením [dB/km]
k	Vlnové číslo [-]
$L_{apereturni}$	Vzdálenost měření [m]
α_{turb}	Turbulentní útlum [dB]
$\sigma_{P,rel}^2$	Relativní variance přijímaného optického výkonu

16. Seznam příloh

Příloha č.1: Ukázka programu pro výpočet a vykreslení grafů relativní variance optické intenzity	67
---	----

Příloha 1: Výpočet relativní variance optické intenzity v programu Matlab

```
close all
clear
clc
```

% Přepřacování 1. vzorku do matice 640 x 480 a kontrolní zobrazení

```
load prvnivzorek.mat          % načte matici z adresáře
size(A1)                     % určí rozměry matice
B=A1(:,3);                   % vybere pouze všechny řádky 3-tího sloupce
size(B)                       % určí nový rozměr matice
X=reshape(B,640,480);        % vezme prvních 640 řádků a dá je do prvního sloupce..
                              % ..vezme dalších 640 řádků a dá je do druhého sloupce..
                              % ..až bude matice 640 řádků x 480sloupců
vzorek_1=X.';                % provede transformaci matice, prohodí první sloupec za první..
                              % ..řádek atd. výsledkem je matice 640 sloupců a 480 řádků..
                              % ..odpovídající snímku z ccd snímače
size(vzorek_1)                % kontrola rozměrů matice

figure                        % vykreslení naměřeného vzorku z důvodu „optické“ kontroly..
i=640                         %.. zda nedošlo ke špatnému seřazení matice, což by vedlo..
j=480                         %.. ke špatným výpočtům
mesh(vzorek_1)
axis ij
xlim([0 640])
ylim([0 480])
zlim([0 200])
title('Namereny profil svazku 1-ho vzorku pomocí profilometru')
xlabel('640 bodu')
ylabel('480 bodu')
zlabel('Intenzita svazku')
```

% Přepřacování 2. vzorku do matice 640 x 480 a kontrolní zobrazení

```
load druhyvzorek.mat         % načte matici z adresáře
size(A2)                     % určí rozměry matice
B=A2(:,3);                   % vybere pouze všechny řádky 3-tího sloupce
size(B)                       % určí nový rozměr matice
X=reshape(B,640,480);        % vezme prvních 640 řádků a dá je do prvního sloupce..
                              % ..vezme dalších 640 řádků a dá je do druhého sloupce..
                              % ..až bude matice 640 řádků x 480sloupců
vzorek_2=X.';                % provede transformaci matice, prohodí první sloupec za první..
                              % ..řádek atd. výsledkem je matice 640 sloupců a 480 řádků..
                              % ..odpovídající snímku z ccd snímače
size(vzorek_2)                % kontrola rozměrů matice

figure                        % vykreslení naměřeného vzorku z důvodu „optické“ kontroly..
i=640                         %.. zda nedošlo ke špatnému seřazení matice, což by vedlo..
j=480                         % ..ke špatným výpočtům
mesh(vzorek_2)
```

```

axis ij
xlim([0 640])
ylim([0 480])
zlim([0 200])
title('Namereny profil svazku 2-ho vzorku pomocí profilometru')
xlabel('640 bodu')
ylabel('480 bodu')
zlabel('Intenzita svazku')

```

% Přepřacování 3. vzorku do matice 640 x 480 a kontrolní zobrazení

```

load tretivzorek.mat          % načte matici z adresáře
size(A3)                     % určí rozměry matice
B=A3(:,3);                   % vybere pouze všechny řádky 3-tího sloupce
size(B)                       % určí nový rozměr matice
X=reshape(B,640,480);        % vezme prvních 640 řádků a dá je do prvního sloupce..
                              % ..vezme dalších 640 řádků a dá je do druhého sloupce..
                              %.. až bude matice 640 řádků x 480sloupců
vzorek_3=X.';                 % provede transformaci matice, prohodí první sloupec za první..
                              % ..řádek atd. výsledkem je matice 640 sloupců a 480 řádků..
                              %.. odpovídající snímku z ccd snímače
size(vzorek_3)                % kontrola rozměrů matice

figure                         % vykreslení naměřeného vzorku z důvodu „optické“ kontroly..
i=640                          % ..zda nedošlo ke špatnému seřazení matice, což by vedlo..
j=480                          % ..ke špatným výpočtům
mesh(vzorek_3)
axis ij
xlim([0 640])
ylim([0 480])
zlim([0 200])
title('Namereny profil svazku 3-ho vzorku pomocí profilometru')
xlabel('640 bodu')
ylabel('480 bodu')
zlabel('Intenzita svazku')

```

% Přepřacování 4. vzorku do matice 640 x 480 a kontrolní zobrazení

```

load ctvrtyvzorek.mat        % načte matici z adresáře
size(A4)                     % určí rozměry matice
B=A4(:,3);                   % vybere pouze všechny řádky 3-tího sloupce
size(B)                       % určí nový rozměr matice
X=reshape(B,640,480);        % vezme prvních 640 řádků a dá je do prvního sloupce..
                              % ..vezme dalších 640 řádků a dá je do druhého sloupce..
                              % ..až bude matice 640 řádků x 480sloupců
vzorek_4=X.';                 % provede transformaci matice, prohodí první sloupec za první..
                              % ..řádek atd. výsledkem je matice 640 sloupců a 480 řádků..
                              % ..odpovídající snímku z ccd snímače
size(vzorek_4)                % kontrola rozměrů matice

figure                         % vykreslení naměřeného vzorku z důvodu „optické“ kontroly..

```

```

i=640 % ..zda nedošlo ke špatnému seřazení matice, což by vedlo..
j=480 % ..ke špatným výpočtům
mesh(vzorek_4)
axis ij
xlim([0 640])
ylim([0 480])
zlim([0 200])
title('Namereny profil svazku 4-ho vzorku pomocí profilometru')
xlabel('640 bodu')
ylabel('480 bodu')
zlabel('Intenzita svazku')

```

% Přepřacování 5. vzorku do matice 640 x 480 a kontrolní zobrazení

```

load patyvzorek.mat % načte matici z adresáře
size(A5) % určí rozměry matice
B=A5(:,3); % vybere pouze všechny řádky 3-tího sloupce
size(B) % určí nový rozměr matice
X=reshape(B,640,480); % vezme prvních 640 řádků a dá je do prvního sloupce..
% ..vezme dalších 640 řádků a dá je do druhého sloupce..
% ..až bude matice 640 řádků x 480sloupců
vzorek_5=X.'; % provede transformaci matice, prohodí první sloupec za první..
% ..řádek atd. výsledkem je matice 640 sloupců a 480 řádků..
% ..odpovídající snímku z ccd snímače
size(vzorek_5) % kontrola rozměrů matice

figure % vykreslení naměřeného vzorku z důvodu „optické“ kontroly..
i=640 % ..zda nedošlo ke špatnému seřazení matice, což by vedlo..
j=480 % ..ke špatným výpočtům
mesh(vzorek_5)
axis ij
xlim([0 640])
ylim([0 480])
zlim([0 200])
title('Namereny profil svazku 5-ho vzorku pomocí profilometru')
xlabel('640 bodu')
ylabel('480 bodu')
zlabel('Intenzita svazku')

```

% Výpočet relativní variance optické intenzity

```

vzorek_1nadruhou=vzorek_1.^2;
vzorek_2nadruhou=vzorek_2.^2;
vzorek_3nadruhou=vzorek_3.^2;
vzorek_4nadruhou=vzorek_4.^2;
vzorek_5nadruhou=vzorek_5.^2;

suma_jednotlivych_prvku_nadruhou_a_jejich_prumerna_hodnota=((vzorek_1.^2)
+(vzorek_2.^2)+(vzorek_3.^2)+(vzorek_4.^2)+(vzorek_5.^2))./5;

prumerna_hodnota_vsech_vzorku_nadruhou=((vzorek_1)+(vzorek_2)+(vzorek_3)
+(vzorek_4)+(vzorek_5))./5).^2;

```

```

citatel=((suma_jednotlivych_prvku_nadruhou_a_jejich_prumerna_hodnota)-
(prumerna_hodnota_vsech_vzorku_nadruhou));

rel_var_opt_int=((citatel)
./(suma_jednotlivych_prvku_nadruhou_a_jejich_prumerna_hodnota));

size(rel_var_opt_int)          % kontrola rozměrů výsledné matice
figure                        % vykreslení relativní variance optické intenzity..
i=640                          % ..pro všechny body matice 640 x 480 a zobrazení..
j=480                          % ..v grafu 3D
mesh(rel_var_opt_int)
axis ij
xlim([0 640])
ylim([0 480])
zlim([0 0.6])
xlabel('x [ um ]')
ylabel('y [ um ]')
zlabel('relativní variance optické intenzity')
set(gca,'XTick',0:100:640);
set(gca,'XTickLabel',{'0','900','1800','2700','3600','4500','5400'}); % přenastavení os na skutečné
set(gca,'YTick',0:100:480); % rozměry
set(gca,'YTickLabel',{'0','830','1660','2490','3320'});

```